# ANEXO C

# DETERMINAÇÃO DE BLINDAGENS EM RADIOTERAPIA

Renato Di Prinzio e Alessandro Facure - CGMI/DRS/CNEN

## C.1. CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS

Para fins de gerenciamento da proteção radiológica, os titulares devem classificar as áreas de trabalho com radiação ou material radioativo em áreas controladas, áreas supervisionadas ou áreas livres, conforme apropriado.

Uma área será classificada como **área controlada** quando medidas específicas de proteção e segurança forem necessárias para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das exposições potenciais.

As áreas controladas devem ser limitadas fisicamente por paredes ou barreiras físicas e devem ser sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, acompanhado de um texto que descreva o tipo de material, equipamento ou uso relacionado à radiação ionizante. O acesso às salas deve ser provido de intertravamento quando apropriado. No acesso à sala deve estar disponibilizado, procedimento de emergência escrito e visível, bem como telefone de emergência. Os indivíduos que utilizam essas áreas devem possuir monitoração individual.

Na prática da radioterapia as áreas controladas incluem:

- Salas de tratamento com feixes externos de radiação;
- Salas de tratamento com equipamentos de braquiterapia remota de alta taxa de dose;
- Salas de tratamento com fontes de braquiterapia de baixa taxa de dose;
- Todas as salas onde são armazenadas e manipuladas fontes radioativas.

Uma área será classificada como **área supervisionada** quando, embora não requeira a adoção de medidas específicas de segurança e proteção radiológica, devem ser feitas avaliações regulares das condições de exposições ocupacionais, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada. Essas áreas devem ser indicadas como tal, em seus acessos.

Na prática de radioterapia, uma área supervisionada pode incluir a região do comando dos equipamentos de radioterapia e as áreas ao redor de salas de tratamento ou ao redor de salas onde são armazenadas e manipuladas fontes radioativas.

Toda área que não seja controlada ou supervisionada é considerada como **área livre,** e deve ser mantida de maneira que as pessoas nela presentes recebam doses de radiação no mesmo nível de proteção de indivíduos do público.

## C.2. MONITORAÇÃO DE ÁREAS

Devem ser elaborados programas de monitoração de área de forma que uma monitoração inicial seja conduzida imediatamente após a instalação de um equipamento

ou fonte de radiação e imediatamente após a substituição de um equipamento ou fonte de radiação. A monitoração inicial deve incluir a medição da radiação de fuga de equipamentos, quando pertinente, e a medição das áreas ocupadas ao redor de salas de irradiação.

Todos os instrumentos utilizados para monitoração de área devem ser calibrados, sendo a calibração rastreada à rede de metrologia das radiações ionizantes.

## C.3. CÁLCULO DE BLINDAGEM EM INSTALAÇÕES DE RADIOTERAPIA

Os parâmetros tempo, distância e blindagem estão envolvidos no desenvolvimento de um projeto de blindagem que consiste, basicamente, de três passos:

1) Estabelecer um valor da dose de radiação (ver Cap. 5, 5.3.7) a ser obtido para a área ocupada.
2) Estimar o valor da dose de radiação na área ocupada, caso não houvesse blindagem.
3) Obter o fator de atenuação necessário para reduzir o valor da dose em (2) para o valor da dose de radiação em (1).

Ao se elaborar um projeto de blindagem em radioterapia deve-se buscar manter as áreas com maior ocupação o mais longe possível de salas onde a prática é conduzida, e colocar ao redor dessas salas áreas com pouca ou nenhuma ocupação (e.g. teto com controle de acesso e corredores ao redor de salas de tratamento).

Na prática de radioterapia, as salas de tratamento devem ser dimensionadas de forma a facilitar o transporte de pacientes em macas, além de equipamentos (partes do irradiador), instrumentação de dosimetria e de serviços de limpeza. A construção da sala com um labirinto permitirá a redução de espessura de blindagem de portas, tanto para feixes de fótons como para nêutrons, evitando-se assim a necessidade de mecanismos elétricos ou hidráulicos para abertura e fechamento.

A construção de salas de tratamento pode ser de seis categorias: aceleradores lineares de partículas, irradiadores de Co-60, aparelhos de raios X de ortovoltagem, aparelhos de raios X de diagnóstico, braquiterapia remota de alta taxa de dose e braquiterapia de baixa taxa de dose. O detalhamento de cálculo de blindagem para cada tipo de sala segue regras e convenções similares, embora cada tipo de sala necessite de requerimentos e restrições específicos. Se uma sala contém somente fontes de braquiterapia de baixa taxa de dose que estão na maior parte do tempo armazenadas em cofre blindado no interior da sala, é provável que não sejam necessários requisitos de blindagens, principalmente se forem previstos biombos móveis de chumbo a serem colocados ao redor da cama do paciente. As salas para equipamentos de teleterapia, raios X e braquiterapia de alta taxa de dose requerem blindagem especial para proteger os operadores, corpo clínico, pacientes e o público.

**Exemplo**

Como exemplo da metodologia do cálculo de barreiras, será apresentado juntamente com o texto deste anexo o cálculo das barreiras de uma sala de radioterapia onde funcionará um acelerador linear de elétrons produzindo dois feixes de fótons (raios X), com energias de 6 MeV de 15 MeV, e feixes de elétrons, com energias de 4, 6, 9, 12, 16 MeV. Os cálculos apresentados servem apenas como ilustração, para o cálculo de uma sala real deve ser consultada a bibliografia recomendada no final deste anexo. As

figuras esquemáticas da sala do irradiador utilizadas no exemplo foram gentilmente cedidas pela física Débora Maria Brandão Russo.

Esse acelerador será utilizado para tratamento de radioterapia em 3 dimensões (3D) e de intensidade modulada (IMRT). O acelerador possui um cabeçote com rotação de $360^{o}$, colimadores independentes e colimadores secundários do tipo multilâminas, fornecendo o campo máximo de radiação primária de (40 x 40) cm² no isocentro, que fica a 100 cm do alvo. O rendimento (taxa de dose absorvida) no isocentro, no centro do campo, é de 800 $cGy.min^{-1}$. A radiação de fuga do cabeçote, atestada pelo fabricante, é de 0,1% do rendimento máximo no isocentro.

A sala de tratamento fica no andar térreo de uma instalação de radioterapia, sendo um lado vizinho a um estacionamento (barreira A), um lado ocupado por uma sala de espera (barreira B), um lado ocupado pelo comando do equipamento (barreira C) e um lado vizinho à outra sala de tratamento, onde estará operando outro acelerador (barreira D). Sobre o teto será projetado o sistema de refrigeração da instalação de radioterapia.

A localização da sala do acelerador e sua circunvizinhança são mostradas na figura 1. Nessa figura está apresentada a classificação das áreas da instalação.

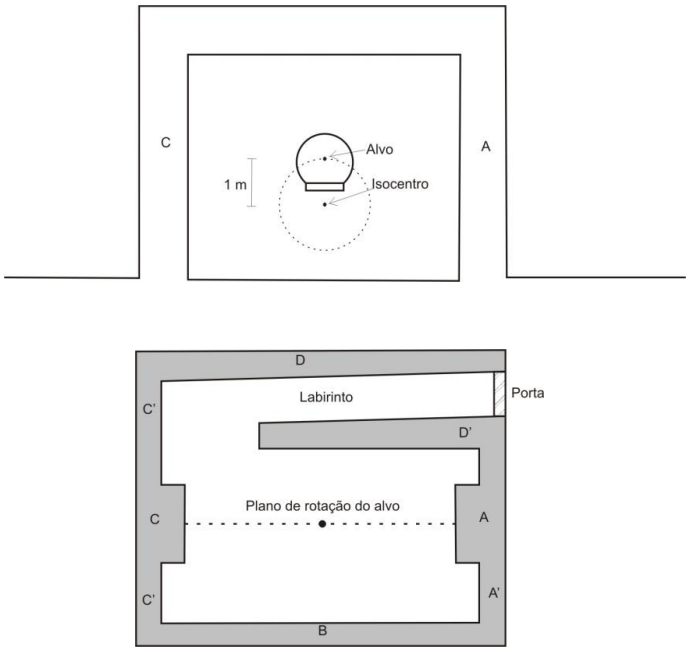



**Figura C.1** - Esquema simplificado de uma sala de tratamento de radioterapia com um acelerador linear de elétrons. O equipamento pode girar em torno do isocentro, a 1 m do alvo (linha pontilhada). A figura superior mostra o corte da sala passando pelo cinturão primário (paredes A, C e teto). Na figura inferior é possível visualizar as barreiras secundárias A', B, C', D e D'.

### C.3.1. Estabelecendo a dose de radiação semanal para a área ocupada

O estabelecimento da dose semanal ***H*** ($Sv.semana^{-1}$) numa área ocupada é feito a partir dos requisitos de otimização, com a condição de que as doses devidas a todas as fontes relevantes, permanecerão abaixo dos limites de doses efetivas para as pessoas que ocuparão a área blindada. Para se estabelecer o limite de dose, deve-se, ainda:

- não considerar a atenuação do feixe pelo paciente;
- assumir a máxima radiação de fuga possível;
- superestimar a carga de trabalho e os fatores de uso e ocupação para a área;
- considerar que as necessidades de blindagens para os feixes de fótons suplantam as necessidades para feixes de elétrons; e
- considerar que as necessidades de blindagens para os feixes de fótons de maior energia suplantam as necessidades para os de menor energia (aceleradores duais).

Uma revisão crítica dos itens supramencionados deve ser realizada na elaboração de cada projeto, para se tomar uma decisão balanceada e evitar o acúmulo de medidas conservativas que poderão resultar em blindagens superdimensionadas.

O uso de um limite derivado de $H = 0{,}02\ mSv.semana^{-1}$ faria com que a área a ser blindada pudesse vir a ser considerada como livre, com ocupação permanente por membros do público. Em comparação com áreas controladas, as espessuras dessas barreiras seriam bem mais elevadas. Para áreas controladas, o limite derivado para restrição de dose é de $H = 0{,}4\ mSv.semana^{-1}$. As áreas projetadas para atender a esse limite são áreas ocupadas exclusivamente por trabalhadores como, por exemplo, a região do comando dos equipamentos.

Nos cálculos de blindagens em radioterapia, geralmente se considera que a dose de radiação calculada ou medida é uma aproximação conservativa da dose efetiva para um indivíduo naquele mesmo ponto.

### C.3.2. Cálculo das doses de radiação na área ocupada, sem a blindagem

Em cálculos de blindagens, a seguinte terminologia é, em geral, empregada:

- Radiação primária: é a radiação emitida diretamente do equipamento usado nos tratamentos através da abertura do colimador, no caso de teleterapia, e da fonte de radiação, no caso de braquiterapia.
- Radiação espalhada: é a radiação produzida pelo espalhamento da radiação primária por diferentes materiais atingidos pelo feixe primário, como paciente, colimadores, acessórios diversos e o próprio ar.
- Radiação de fuga do cabeçote: é a radiação que escapa através do cabeçote de blindagem do equipamento (para aceleradores a radiação de fuga somente existe enquanto o feixe estiver ligado; para equipamentos com fontes incorporadas a radiação de fuga estará sempre presente).
- Carga de trabalho ($W$): definida como o rendimento do acelerador, determinado no ponto de máxima dose, a 1 m da fonte (usualmente o isocentro do equipamento), em $Gy.m^2.semana^{-1}$. A carga de trabalho pode ser determinada pela multiplicação do número de pacientes tratados por semana e a dose absorvida média administrada em cada tratamento, acrescida da dose absorvida total semanal, no isocentro, utilizada em outras irradiações (controle da qualidade, manutenção do equipamento e pesquisa).

**Exemplo**

A carga de trabalho total do acelerador será determinada a partir das cargas de trabalho de cada tipo de tratamento e dos testes de controle da qualidade e manutenção do acelerador. Para um cálculo conservativo pode-se assumir que o feixe utilizado é o de mais alta energia de fótons como, por exemplo, um feixe de 15 MeV. Nesse

acelerador, serão tratados 40 pacientes por dia, durante 5 dias por semana com a técnica de radioterapia formatada tridimensional (3D), com uma média de 1,5 isocentros por paciente. Cada paciente receberá a dose média de 2 Gy por isocentro. Nesse caso, a carga de trabalho clínica será dada por:

$$W_{3D} = 40 \times 5 \times 1{,}5 \times 2 = 600\, Gy.semana^{-1}$$

Também serão tratados 6 pacientes por dia, durante 5 dias por semana com a técnica de radioterapia com intensidade modulada (IMRT). Nesse tratamento cada paciente receberá a dose média de 2 Gy por dia de tratamento. Assim, no exemplo tem-se que:

$$W_{IMRT} = 6 \times 5 \times 2 = 60\, Gy.semana^{-1}$$

Devido à acentuada colimação dos feixes e ao grande número de campos utilizados no tratamento em IMRT, a quantidade de unidades monitoras (UM) - semelhante ao tempo de irradiação de uma bomba de cobalto - necessária para fornecer uma dose absorvida na região tratada é muito maior do que seria necessária em um tratamento convencional para a mesma dose no paciente, o que aumenta consideravelmente o tempo de utilização do acelerador para esses procedimentos (*beam on*). Devido ao maior número de UM, a carga de trabalho devido à fuga de radiação do cabeçote, que é proporcional ao tempo de *beam on*, também é aumentada nesse tipo de tratamento. A razão entre o valor médio de UM por unidade de dose necessária em IMRT e em um tratamento convencional é conhecido como *fator de IMRT* ($C_I$).

Para se obter o valor de $C_I$ pode-se tomar uma amostra de casos de tratamentos utilizando a técnica de IMRT (NCRP, 2005) e determinar a quantidade média de unidades monitoras necessária para administrar a dose prescrita por fração, para cada caso "i". Calcula-se então a quantidade de unidades monitoras necessária para entregar a mesma dose a 10 cm de profundidade de um fantoma posicionado com sua superfície (campo de radiação "convencional" de 10 cm X 10 cm) no isocentro do acelerador. O valor de $C_I$ é igual a razão entre a quantidade de unidades monitoras em IMRT e no campo de 10 cm X 10 cm. Os valores típicos de $C_I$ variam entre 2 e 10 e, em geral, é adotado o valor de $C_I = 5$.

Para a realização de medições de controle da qualidade do feixe de radiação, será utilizado o valor recomendado de 100 Gy.semana$^{-1}$ para o feixe de fótons com energia de 15 MeV.

$$W_{CQ} = 100\, Gy.semana^{-1}$$

Então, a carga de trabalho total do acelerador é dada por:

$$W = W_{3D} + W_{IMRT} \times C_1 + W_{CQ} = 1.000\, Gy.semana^{-1} \quad (1)$$

### C.3.3. Atenuação do feixe de radiação pela blindagem

A barreira primária, ou cinturão primário, é a parte das paredes, do piso e do teto da sala de tratamento que pode ser irradiada diretamente pelo feixe primário.

As barreiras secundárias são todas as partes das paredes da sala de tratamento, teto e piso que não são atingidas diretamente pelo feixe primário. Essas barreiras

fornecem blindagem contra as radiações espalhada e de fuga produzidas na sala de tratamento. Como, em geral, os equipamentos de tratamento são instalados no nível do solo, a blindagem do piso nesses casos não leva em consideração, em seu cálculo, a contribuição para as radiações primária, espalhada e de fuga.

O **fator de uso** (*U*) para uma barreira em particular é a fração do tempo em que o feixe primário está direcionado para a barreira durante o funcionamento do equipamento. Para a barreira primária, a soma dos fatores de uso deve ser igual à unidade.

Na prática clínica os valores de *U* podem ser determinados a partir das direções preferenciais do feixe de tratamento, aumentando-se o valor de *U* para uma ou outra direção, como por exemplo, direcionado para o piso, ou para uma das paredes laterais. É comum a utilização do fator de uso com peso igual para as quatro direções, ou seja, 25% para cada uma das paredes laterais, teto e piso (NCRP, 2005). Outros valores podem ser adotados, a partir da prática clínica, onde se utiliza o percentual de tratamentos utilizados.

Para todas as barreiras secundárias *U* é sempre igual à unidade, pois a radiação secundária está presente sempre que houver feixe de radiação. Valores típicos de *U* são mostrados na Tabela C.1.

**Tabela C.1** - Valores típicos para o fator de uso.

| **Barreira** | **U** | |
|---|---|---|
| Primária | * | NCRP 151 |
| Horizontal Esquerda (± 45º) | 1/7 | 1/4 |
| Horizontal Direita (± 45º) | 1/7 | 1/4 |
| Vertical para cima (± 45º) | 2/7 | 1/4 |
| Vertical para baixo (± 45º) | 3/7 | 1/4 |
| Secundária | 1 | |

*Adotado em muitos serviços de radioterapia no Brasil

O **fator de ocupação** (*T*) é o parâmetro que leva em consideração a fração de tempo em que o individuo mais exposto está presente naquela região. Na prática, considera-se que a distância mínima de uma barreira onde estará presente um indivíduo é de 0,3 m. A Tabela C.2 mostra alguns fatores de ocupação sugeridos (NCRP, 2005) para o cálculo de blindagens.

**Tabela C.2** - Valores sugeridos para o fator de ocupação (NCRP, 2005).

| **Local** | **T** |
|---|---|
| Áreas integralmente ocupadas (sempre ocupadas por uma pessoa)<br>*e.g.* escritórios, consultórios, salas de planejamento, enfermaria, recepção. | 1 |
| Sala de tratamento adjacente, sala de exame adjacente à sala de tratamento. | 1/2 |
| Corredores, sala de repouso ou banheiro de funcionários. | 1/5 |
| Portas de salas de tratamento. | 1/8 |
| Banheiros públicos, depósitos, sala de espera. | 1/20 |
| Áreas externas com passagem de pedestres ou veículos, estacionamento, escadas, elevadores (sem ascensorista). | 1/40 |

Ao se usar um fator de ocupação baixo para uma região adjacente a uma sala de tratamento, deve-se ter o cuidado de considerar o uso futuro do local, pois poderá vir a ter um fator de ocupação maior, passando a ter maior importância na determinação da blindagem.

Os feixes de raios X e gama são atenuados de forma exponencial através dos materiais. A intensidade do feixe diminui a cada espessura de blindagem adicionada e,

teoricamente, nunca se torna zero. Portanto, é necessário determinar o fator de transmissão (*B*) da barreira pelo qual se obtém o nível de dose desejado. Sem a blindagem, a taxa de dose a uma distancia *d* da fonte, no eixo central do feixe, é dada por:

$$\dot{D}_a = \frac{WUT}{d^2} \tag{2}$$

onde *W* é a carga de trabalho (Gy/sem); *U* é o fator de uso; *T* é o fator de ocupação e *d* a distância (m). Após certa espessura de blindagem, a taxa de dose é reduzida pelo fator de transmissão (*B*) da barreira para:

$$\dot{D} = \frac{BWUT}{d^2} \tag{3}$$

onde B é sempre um valor menor que 1. B = 1 significa uma transmissão de 100%, ou seja, inexistência de blindagem. Esse valor de taxa de dose deve ser comparado com o limite de dose para a região em questão, e a barreira deve então ser aumentada ou diminuída de acordo com o resultado desejado.

### C.3.4. Transmissão da radiação primária

#### *C.3.4.1 Fator de transmissão da barreira primária*

Pode-se estimar o valor de transmissão requerida para blindar um determinado ponto a ser protegido, dividindo-se o limite de dose permitido para aquele ponto pela dose estimada para aquela região, na ausência de blindagens. Assim, o fator de transmissão da barreira para a radiação primária é dado por:

$$B_{pri} \geq \frac{P}{\dot{D}} = \frac{P(d_{pri})^2}{WUT} \tag{4}$$

onde,

*B* é o fator de transmissão da barreira primária;
*P* é o limite semanal de dose permitido (Sv.semana$^{-1}$);
$d_{pri}$ é a distância (m) entre a fonte de radiação e o ponto protegido (geralmente a 0,30 m da barreira);
*W* é a carga de trabalho (Gy.semana$^{-1}$) da fonte de radiação;
*U* é o fator de uso;
*T* é o fator de ocupação.

Por exemplo, se o limite de dose para uma região adjacente à sala de tratamento é de 1 mSv/ano e a dose estimada para aquele mesmo ponto é de 10 mSv/ano, então é necessária uma blindagem que proporcione uma atenuação por um fator 10, ou seja, B = 0,1. A espessura da blindagem correspondente ao valor de $B_{pri}$ determinado acima pode ser obtida utilizando-se curvas de atenuação.

A camada semi-redutora (*HVL*) e a camada deci-redutora (*TVL*) são as espessuras de material atenuador que reduzem a intensidade do feixe para 50% e 10% do valor original, respectivamente. Pode-se calcular o número de camadas deci-

redutoras ($N_{TVL}$) do material de blindagem necessárias para atingir o nível de proteção desejado através da relação:

$$N_{TVL} = -\log_{10}(B) = \log(1/B) \tag{5}$$

A Tabela C.3 apresenta propriedades de alguns dos materiais mais utilizados para construção de blindagens primária e secundária. A Tabela C.4 apresenta os valores da primeira camada deci-redutora (TVL1) e das subsequentes (TVL2) ou de equilíbrio (NCRP, 1977) para concreto, aço e chumbo para algumas energias de feixes de radiação. Alguns dados para valores de camadas deci-redutoras para concretos de alta densidade também estão disponíveis na literatura (Facure e Silva, 2007). A espessura da barreira pode ser dada por:

$$S = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 \tag{6}$$

**Tabela C.3** - Propriedades de materiais usados em blindagem (Profio, 1979).

| Propriedades | Concreto Comum | Concreto Pesado | Chumbo | Aço | Polietileno |
|---|---|---|---|---|---|
| Densidade ($g.cm^{-3}$) | 2,2 – 2,4 | 3,7 – 4,8 | 11,35 | 7,87 | 0,95 |
| Número atômico efetivo | 11 | ~ 26 | 82 | 26 | 5,5 |
| Concentração de hidrogênio* $10^{22}$ átomos $cm^{-3}$ | 0,8 – 2,4 | 0,8 – 2,4 | 0 | 0 | 0 |
| Ativação por nêutrons | Pequena | Grande | (*) | Moderado | Nulo |
| Custo relativo (concreto comum = 1) | 1 | 6 | 20 | 2 | 20 |

(*) O grau de ativação dependerá primariamente das impurezas no chumbo.

**Tabela C.4** - Camadas deci-redutoras para concreto, aço e chumbo com as densidades médias dadas na Tabela C.3 (NCRP, 2005).

| Energia do feixe (MeV) | Material da blindagem | $TVL_1$ (m) | $TVL_2$ (m) |
|---|---|---|---|
| 6 | Concreto | 0,37 | 0,33 |
| | Aço | 0,10 | 0,10 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| 10 | Concreto | 0,41 | 0,37 |
| | Aço | 0,11 | 0,10 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| 15 | Concreto | 0,44 | 0,41 |
| | Aço | 0,11 | 0,11 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| 18 | Concreto | 0,45 | 0,43 |
| | Aço | 0,11 | 0,11 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| 20 | Concreto | 0,46 | 0,44 |
| | Aço | 0,11 | 0,11 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| 25 | Concreto | 0,49 | 0,46 |
| | Aço | 0,11 | 0,11 |
| | Chumbo | 0,057 | 0,057 |
| Co-60 | Concreto | 0,21 | 0,21 |
| | Aço | 0,07 | 0,07 |
| | Chumbo | 0,04 | 0,04 |

### *C.3.4.2. Largura da barreira primária*

Para determinar a largura da barreira primária deve-se determinar o ângulo de abertura do feixe primário, a fim de que a blindagem para a radiação espalhada da barreira primária para a secundária seja adequadamente projetada. Na prática, a largura apropriada da barreira é obtida utilizando-se o maior tamanho de campo de radiação na distância de isocentro do acelerador, $x$ (m), com os colimadores rotacionados por 45º, acrescentando-se, por segurança, 0,3 m de cada lado. Para o parâmetro $x$, geralmente adota-se o valor de 40 cm. Como a maioria dos aceleradores possui campo de radiação máximo de (40 x 40) cm² no isocentro de 100 cm, o semi-ângulo da abertura do feixe é de aproximadamente 14º. Dessa forma, a largura de uma barreira, $L_C$ (m), posicionada a uma distância $d_{pri}$ (m) entre a fonte de radiação e o ponto protegido, será dada por:

$$L_C = (x \cdot \sqrt{2}) \cdot d_{pri} + 0{,}6 = 0{,}566 \cdot d_{pri} + 0{,}6 \qquad (7)$$

Se a protuberância da barreira for construída para o interior da sala, o valor $d_{pri}$ é tomado desde a face interna da barreira secundária (Figura C.2a). Se a protuberância da barreira for construída no lado externo da sala, o valor $d_{pri}$ é tomado desde a face externa da barreira secundária (Figura C.2b).

Como, em geral, as alturas das salas são muito menores do que as distâncias entre as paredes, a largura da barreira primária do teto é consideravelmente menor do que o valor determinado para as paredes. Porém, para facilitar a construção, sem a necessidade de um arranjo estrutural complexo, em geral utiliza-se a maior largura determinada, para toda a barreira primária.

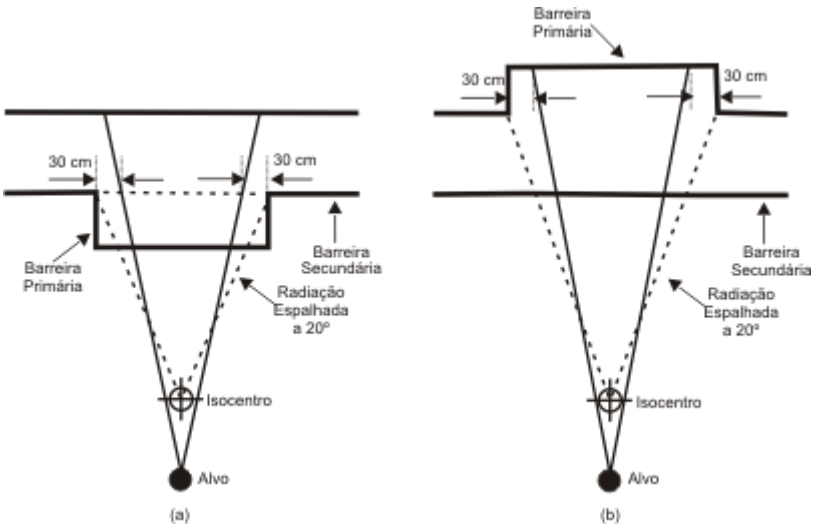



**Figura C.2** – Largura da barreira primária quando a protuberância é construída no lado interno da sala (a) e no lado externo da sala (b) de tratamento (NCRP, 2005).

**Exemplo de cálculo de barreiras**

A sala que abrigará o acelerador será construída utilizando-se concreto usinado convencional com densidade de 2,35 g.cm$^{-3}$. Para esse material, as camadas deci-redutoras para feixes de fótons com energia de 15 MeV, apresentadas na tabela 4, são

$TVL_1$ = 44,0 cm e $TVL_2$ = 41,0 cm.

A Figura C.3 mostra um esquema da sala do acelerador que será utilizada para a determinação da barreira primária (cinturão) do feixe de radiação.

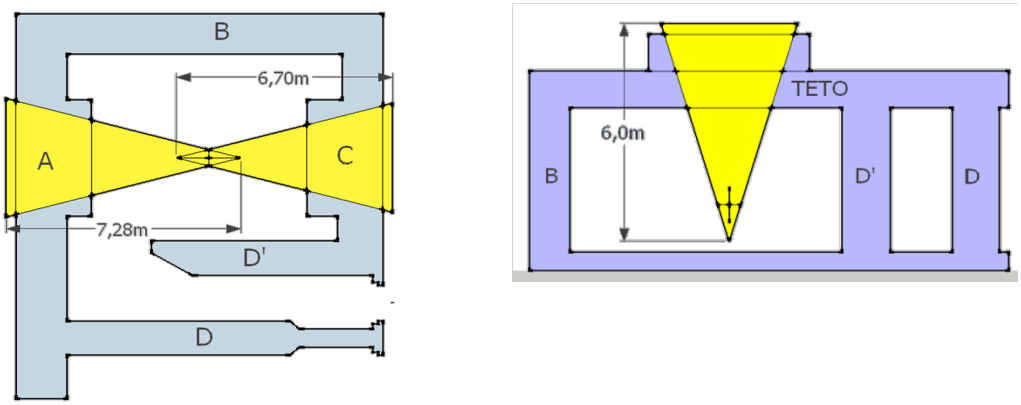



**Figura C.3** - Esquema da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando os pontos utilizados para o cálculo da espessura da barreira primária (cinturão). Note-se que os pontos calculados situam-se a 0,3 m da parede.

**a) Barreira primária - A**

O ponto A delimita-se com um estacionamento que tem acesso de membros do público (área livre). Nesse ponto o fator de uso é igual a 1/4 e o fator de ocupação, conforme a Tabela C.2, é 1/40. Assim, o fator de transmissão da blindagem para atenuar o feixe de fótons com energia de 15 MeV, é determinado por:

$$B_A = \frac{P(d_{pri})^2}{WUT} = \frac{2.10^{-5} \cdot (7{,}28)^2}{1000 \cdot (1/4) \cdot (1/40)} = 1{,}7 \cdot 10^{-4}$$

O número de camadas deci-redutoras é dado pela equação:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(1{,}7 \cdot 10^{-4}) = 3{,}8$$

A espessura da barreira é determinada pela equação:

$$S = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TLT_2 = 0{,}44 + (3{,}8 - 1) \cdot 0{,}41 = 1{,}58 \cong 1{,}6m$$

A largura do cinturão para este ponto é dada por:

$$L_C = 0{,}566 \cdot d_{pri} + 0{,}6$$
$$= (0{,}566 \cdot 6{,}0) + 0{,}6 \approx 4{,}0 \text{ m}$$

**b) Barreira primária - C**

No ponto C encontra-se o painel de comando do acelerador, sendo considerada uma área controlada ocupada por indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE). Para esse ponto, o fator de uso é igual a 1/4 e o fator de ocupação, de acordo com a Tabela C.2, é igual a 1. Assim, o fator de transmissão da blindagem para atenuar o feixe de

fótons com energia de 15 MeV, é determinado por:

$$B_C = \frac{P(d_{pri})^2}{WUT} = \frac{4.10^{-4} \cdot (6,7)^2}{1000 \cdot (1/4) \cdot (1)} = 7,18 \cdot 10^{-5}$$

O número de camadas deci-redutoras é:

$$N_{TVT} = -\log(B) = -\log(7,18 \cdot 10^{-5}) = 4,14$$

A espessura da barreira é dada por:

$$S = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0,44 + (4,14 - 1) \cdot 0,41 = 1,73 \cong 1,8m$$

A largura do cinturão para este ponto é dada por:

$$L_C = 0,566 \cdot d_{pri} + 0,6$$
$$= (0,566 \cdot 6,0) + 0,6 \approx 4,0 \text{ m}$$

**c) Barreira primária - Teto**

Sobre o teto da sala serão instalados equipamentos de refrigeração da instalação e, assim, esse ponto fica em uma área livre com acesso de membros do público que formam a equipe de manutenção da máquina e dos seus suplementos. Para esse ponto, o fator de uso é igual a 1/4 e o fator de ocupação, de acordo com a Tabela C.2, é igual a 1/40. Assim, o fator de transmissão da blindagem para atenuar o feixe de fótons com energia de 15 MeV, é determinad0 pela equação:

$$B_C = \frac{P(d_{pri})^2}{WUT} = \frac{2.10^{-5} \cdot (6,0)^2}{1000 \cdot (1/4) \cdot (1/40)} = 1,15 \cdot 10^{-4}$$

O número de camadas deci-redutoras é dado pela equação:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(1,15 \cdot 10^{-4}) = 3,94$$

A espessura da barreira é determinada pela equação:

$$S = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0,44 + (3,94 - 1) \cdot 0,41 = 1,64 \cong 1,7m$$

A largura do cinturão para este ponto é dada por:

$$L_C = 0,566 \cdot d_{pri} + 0,6$$
$$= (0,566 \cdot 4,5) + 0,6 \approx 3,2 \text{ m}$$

**C.3.5. Transmissão da radiação espalhada – Barreiras secundárias**

No caso de barreira secundária deve-se considerar a radiação espalhada pelo paciente, pelas paredes e pela radiação de fuga do cabeçote do equipamento (Figura C.4).

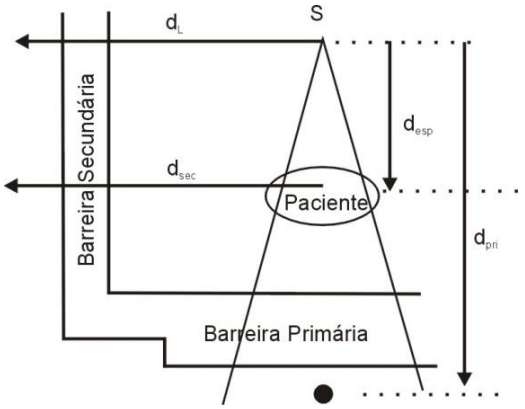



**Figura C.4** - Distâncias utilizadas para se determinar as barreiras secundárias (NCRP, 2005).

O fator de transmissão devido à radiação espalhada pelo paciente ($B_P$) é dado pela expressão:

$$B_P = \frac{P}{aWT}(d_{\text{sec}})^2 (d_{esp})^2 \frac{400}{F} \qquad (8)$$

onde,

$P$ é o limite semanal de dose permitido (Sv.semana$^{-1}$);
$d_{sec}$ é a distância (m) entre a superfície espalhadora e ponto protegido;
$d_{esp}$ é a distância (m) entre o alvo do equipamento e o paciente;
a é a fração de espalhamento, definida como a razão entre a radiação espalhada a um metro do objeto espalhador e a radiação primária a um metro do alvo do equipamento (Tabela C.5);
F é o tamanho de campo de tratamento (cm²) no paciente;
400 tamanho de campo (20 x 20) cm² usado para normalizar os fatores de transmissão para espalhamento.

Na ausência de curvas de transmissão para o feixe espalhado em questão consideram-se as seguintes aproximações conservativas:

- Feixes com energia menor do que 0,5 MeV: igual ao feixe incidente,
- Feixes com energia até 10 MeV: usar 0,5 MeV para reflexão de 90$^o$.

O fator de transmissão devido à fuga pelo cabeçote do equipamento ($B_L$) é dado pela expressão:

$$B_L = \frac{P}{10^{-3} \cdot WT}(d_L)^2 \qquad (9)$$

onde $d_L$ é a distância (m) entre o isocentro do equipamento e o ponto protegido. O fator

$10^{-3}$ representa a atenuação do feixe primário, ou redução da carga de trabalho, pelo cabeçote do acelerador, conforme estabelecido pelos principais fabricantes.

Quando a diferença entre as espessuras requeridas para as barreiras secundárias devido à radiação espalhada e de fuga do cabeçote, for menor que 1 TVL, (i.e. como se o espaço em questão fosse ocupado por duas fontes de intensidades aproximadamente iguais), a adição de uma camada semirredutora ao maior valor fornece uma avaliação conservativa. Caso os dois valores difiram por mais de uma camada deci-redutora, a maior espessura deve ser utilizada. Em casos intermediários, pode ser necessário calcular a transmissão considerando a soma das contribuições para os dois feixes.

**Exemplo**

A espessura da blindagem secundária é obtida a partir dos fatores de transmissão para a radiação espalhada pelo paciente e a radiação de fuga do cabeçote. Nos dois casos utilizam-se os pontos nos quais a distância do isocentro e a região localizada a 0,3 metros fora da parede de interesse, sem passar pela barreira primária, seja a menor possível (Figura C.5).

**Tabela C.5** - Fator de espalhamento (**a**) a 1 m de um fantoma com dimensões humanas, distância alvo-superfície de 1 m e tamanho de campo de 400 cm² (McGinley, 2002; Taylor et al., 1999).

| **Ângulo (º)** | **Fração de espalhamento (a)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **6 MeV** | **10 MeV** | **18 MeV** | **24 MeV** |
| 10 | $1{,}04 \times 10^{-2}$ | $1{,}66 \times 10^{-2}$ | $1{,}42 \times 10^{-2}$ | $1{,}78 \times 10^{-2}$ |
| 20 | $6{,}73 \times 10^{-3}$ | $5{,}79 \times 10^{-3}$ | $5{,}39 \times 10^{-3}$ | $6{,}32 \times 10^{-3}$ |
| 30 | $2{,}77 \times 10^{-3}$ | $3{,}18 \times 10^{-3}$ | $2{,}53 \times 10^{-3}$ | $2{,}74 \times 10^{-3}$ |
| 45 | $1{,}39 \times 10^{-3}$ | $1{,}35 \times 10^{-3}$ | $8{,}64 \times 10^{-3}$ | $8{,}30 \times 10^{-3}$ |
| 60 | $8{,}24 \times 10^{-4}$ | $7{,}46 \times 10^{-4}$ | $4{,}24 \times 10^{-4}$ | $3{,}86 \times 10^{-4}$ |
| 90 | $4{,}26 \times 10^{-4}$ | $3{,}81 \times 10^{-4}$ | $1{,}89 \times 10^{-4}$ | $1{,}74 \times 10^{-4}$ |
| 135 | $3{,}00 \times 10^{-4}$ | $3{,}02 \times 10^{-4}$ | $1{,}24 \times 10^{-4}$ | $1{,}20 \times 10^{-4}$ |
| 150 | $2{,}87 \times 10^{-4}$ | $2{,}74 \times 10^{-4}$ | $1{,}20 \times 10^{-4}$ | $1{,}13 \times 10^{-4}$ |

**a) Barreira secundária - A**

Como citado anteriormente, a região protegida pela barreira A possui fator de ocupação de 1/40. O fator de espalhamento **a**, para a radiação espalhada a 90º a 1 m, é obtido por interpolação dos dados da Tabela C.5. Portanto, o fator de transmissão da parede A é dado por:

$$B_P = \frac{P}{aWT}(d_{\sec})^2 (d_{esp})^2 \frac{400}{F} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2{,}61 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot (1/40)} (1)^2 \cdot (7{,}17)^2 \cdot \frac{400}{1600} = 0{,}0394$$

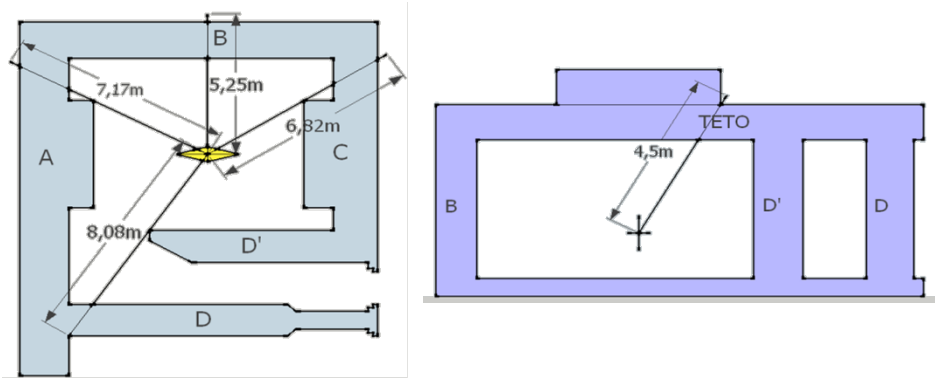



**Figura C.5** - Esquema da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando os pontos utilizados para o cálculo das espessuras das barreiras secundárias. Note-se que os pontos calculados situam-se a 0,3 m da parede.

O número de camadas deci-redutoras é dado por:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(3{,}94 \cdot 10^{-2}) = 1{,}4$$

As camadas deci-redutoras, $TVL_1$ e $TVL_2$, em concreto para a radiação espalhada a 90º, apresentadas na Tabela C.6, são iguais a 18 cm e, assim, a espessura da barreira secundária A será:

$$S_{esp} = N_{TVL} \cdot TVL_1 = 1{,}4 \cdot 0{,}18 = 0{,}25m$$

**Tabela C.6** - Camada deci-redutora em concreto para radiação espalhada pelo paciente em vários ângulos (NCRP, 2005).

| **Ângulo de espalhamento (º)** | **TVL (m)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Co-60** | **6 MeV** | **10 MeV** | **15 MeV** | **18 MeV** | **20 MeV** |
| 15 | 0,22 | 0,34 | 0,39 | 0,42 | 0,44 | 0,46 |
| 30 | 0,21 | 0,26 | 0,28 | 0,31 | 0,32 | 0,33 |
| 45 | 0,20 | 0,23 | 0,25 | 0,26 | 0,27 | 0,27 |
| 60 | 0,19 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,24 |
| 90 | 0,15 | 0,17 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,19 |
| 135 | 0,13 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

Para a fuga de radiação pelo cabeçote, o fator de transmissão da barreira A é dado por:

$$B_L = \frac{P}{0{,}001 \cdot WT}(d_{\text{sec}})^2 = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{0{,}001 \cdot 1000 \cdot (1/40)}(7{,}17)^2 = 0{,}0411$$

O número de camadas deci-redutoras é:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(4{,}04 \cdot 10^{-2}) = 1{,}4$$

A espessura da barreira secundária, devida à fuga no cabeçote, pode ser

determinada utilizando os valores de $TVL_1$ e $TVL_2$ apresentados na Tabela C.7.

**Tabela C.7** - Valores sugeridos para camada deci-redutora em concreto para radiação de fuga (NCRP, 2005).

| **Energia (MeV)** | **$TVL_1$ (m)** | **$TVL_2$ (m)** |
|---|---|---|
| 6 | 0,34 | 0,29 |
| 10 | 0,35 | 0,31 |
| 15 | 0,36 | 0,33 |
| 18 | 0,36 | 0,34 |
| 20 | 0,36 | 0,34 |
| 25 | 0,37 | 0,35 |
| Co-60 | 0,21 | 0,21 |

Valores baseados em adaptação conservativa de valores publicados para 90º.

Então:

$$S_L = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0{,}36 + (1{,}4 - 1) \cdot 0{,}33 = 0{,}49cm$$

A diferença entre as espessuras da barreira secundária para espalhamento e fuga do cabeçote é:

$$\Delta S = S_L - S_{esp} = 0{,}49 - 0{,}25 = 0{,}24m$$

Como essa diferença é menor do que o valor de um TVL deve-se acrescentar a espessura de um HVL na maior espessura obtida. Assim, desde que o valor de uma camada semirredutora para fuga no cabeçote é dado por:

$$HVL = TVL \cdot \log(2) = 0{,}36.0{,}301 = 0{,}11cm$$

a espessura da barreira secundária para a parede A é dada por:

$$S_A = 0{,}49 + 0{,}11 = 0{,}6m$$

**b) Barreira secundária - B**

A parede B delimita a sala de tratamento com a sala de espera de pacientes. Essa é uma área livre com fator de ocupação igual a 1 e o valor de **a** para a radiação espalhada a 90º a 1 m é interpolado a partir dos dados da Tabela C.5. Dessa forma, o fator de transmissão da parede B é determinado por:

$$B = \frac{P}{aWT}(d_{\sec})^2 (d_{esp})^2 \frac{400}{F} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2{,}61 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot (1)}(1)^2 \cdot (5{,}25)^2 \cdot \frac{400}{1600} = 0{,}00053$$

O número de camadas deci-redutoras é dado por:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(5{,}28 \cdot 10^{-4}) = 2{,}30$$

As camadas deci-redutoras, $TVL_1$ e $TVL_2$, em concreto para a radiação espalhada a 90º,

dadas na Tabela C.6, são iguais a 18 cm e a espessura da barreira secundária C é:

$$S_{esp} = N_{TVL} \cdot TVL_1 = 2{,}30 \cdot 0{,}18 \cong 0{,}4m$$

Para essa barreira, o fator de transmissão devido à fuga de radiação pelo cabeçote é dado por:

$$B_L = \frac{P}{0{,}001 \cdot WT}(d_{\sec})^2 = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{0{,}001 \cdot 1000 \cdot (1)}(5{,}25)^2 = 0{,}000551$$

O número de camadas deci-redutoras é dado por:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(5{,}51 \cdot 10^{-4}) = 3{,}26$$

A espessura da barreira secundária devida à fuga no cabeçote pode ser determinada utilizando os valores de $TVL_1$ e $TVL_2$ dados na Tabela C.7. Assim:

$$S_L = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0{,}36 + (3{,}26 - 1) \cdot 0{,}33 = 1{,}11 \cong 1{,}2m$$

A diferença entre as espessuras da barreira secundária para espalhamento e fuga do cabeçote é:

$$\Delta S = S_L - S_{esp} = 1{,}20 - 0{,}4 = 0{,}8m$$

Como essa diferença é maior do que valor do TVL para a fuga do cabeçote adota-se como espessura da blindagem secundária o maior valor encontrado, que é devido à fuga do cabeçote, de 1,2 m.

**c) Barreira secundária - D**

A parede D delimita a sala de tratamento e a sala onde está instalado outro irradiador. Os pacientes tratados na outra sala são membros do público, para qualquer irradiação existente na sala que se está calculando. Assim, essa parede delimita uma área livre com fator de ocupação igual a 1/2, conforme a Tabela C.2. Como determinado anteriormente, o valor de **a** para a radiação espalhada a 90º a 1 m é interpolado a partir dos dados da Tabela C.5. Portanto, o fator de transmissão da parede D é:

$$B = \frac{P}{aWT}(d_{\sec})^2 (d_{esp})^2 \frac{400}{F} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2{,}61 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot (1/2)}(1)^2 \cdot (8{,}08)^2 \cdot \frac{400}{1600} = 0{,}00250$$

O número de camadas deci-redutoras é dado por:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(2{,}50 \cdot 10^{-3}) = 2{,}60$$

As camadas deci-redutoras, $TVL_1$ e $TVL_2$, em concreto para a radiação espalhada a 90º, dadas na Tabela C.6, são iguais a 18 cm e a espessura da barreira secundária C é:

$$S_{esp} = N_{TVL} \cdot TVL_1 = 2{,}60 \cdot 0{,}18 \cong 0{,}5m$$

Para essa barreira, o fator de transmissão devido à fuga de radiação pelo cabeçote é dado por:

$$B_L = \frac{P}{0{,}001 \cdot WT}(d_{\text{sec}})^2 = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{0{,}001 \cdot 1000 \cdot (1/2)}(8{,}08)^2 = 0{,}0026$$

O número de camadas deci-redutoras é dado por:

$$N_{TVL} = -\log(B) = -\log(2{,}6 \cdot 10^{-3}) = 2{,}58$$

A espessura da barreira secundária devida à fuga no cabeçote pode ser determinada utilizando os valores de $TVL_1$ e $TVL_2$ dados na Tabela C.7. Assim:

$$S_L = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0{,}36 + (2{,}58 - 1) \cdot 0{,}33 = 0{,}88 \cong 0{,}9m$$

A diferença entre as espessuras da barreira secundária para espalhamento e fuga do cabeçote é:

$$\Delta S = S_L - S_{esp} = 0{,}9 - 0{,}5 = 0{,}4m$$

Como essa diferença é maior do que valor do TVL para a fuga do cabeçote adota-se como espessura da blindagem secundária o maior valor encontrado, que é devido à fuga do cabeçote, de 0,9 m.

Essa barreira secundária forma o labirinto e, portanto, é constituída de duas blindagens. Assim, pode-se construir uma das paredes do labirinto com parte da largura e a outra parede com a outra parte, conforme mostra a Figura C.6. Como o labirinto se delimita com outra sala de tratamento, deve-se considerar também o cálculo da blindagem da outra sala para se definir a fração da espessura das paredes do labirinto.

Para se fracionar a espessura determinada acima, deve-se atentar para a passagem interna do labirinto para a sala, pois nessa região há somente a parede externa. Deve-se ainda lembrar o fato de que a espessura da parede D' influi no cálculo da espessura da porta da sala e, portanto o valor adotado para essa parede será levado em conta no cálculo da espessura final da porta, a fim de não torná-la muito pesada.

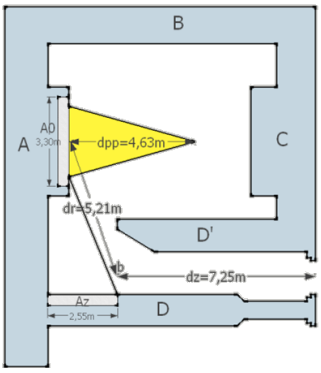



**Figura C.6** - Esquema do labirinto da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando as áreas definidas para a determinação da dose na porta devido ao espalhamento do feixe primário na parede A.

## C.3.6. Transmissão da radiação pela porta da sala - labirinto

### *C.3.6.1. Aceleradores com energia menor ou igual a 10 MeV*

A existência de um labirinto numa sala de tratamento proporciona a vantagem de diminuir o nível de radiação na entrada, reduzindo o peso da porta e facilitando assim o processo de abertura e fechamento da sala. A blindagem da porta pode ser calculada determinando-se as várias componentes que contribuem para a dose naquele ponto. Depois, com a estimativa da dose total, determina-se a espessura de material necessário para reduzir este valor para o limite de dose P (Sv/semana).

A radiação que atinge a porta da sala de um acelerador com fótons de energia abaixo de 10 MeV se deve aos seguintes componentes: $H_S$, devida ao espalhamento da radiação primária nas paredes da sala; $H_{LS}$, devida aos fótons da radiação de fuga do cabeçote espalhados e que atingem a porta; $H_{ps}$, devida aos fótons do feixe primário espalhado pelo paciente; $H_{LT}$, devida à radiação de fuga do cabeçote que atravessa a parede do labirinto.

A dose de radiação na porta devido ao espalhamento do feixe primário na parede A (Figura C.6) é dada por:

$$H_S = \frac{WU_A\alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{\left(d_h d_r d_z\right)^2} \qquad (10)$$

onde,

$H_S$ é a dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida ao espalhamento do feixe primário na parede A;
W é a carga de trabalho (Gy.semana$^{-1}$);
$U_A$ é o fator de uso para a parede G;
$\alpha_0$ é coeficiente de reflexão para fótons incidentes na primeira superfície refletora $A_0$;
$A_0$ é a área (m²) da primeira superfície refletora;
$\alpha_z$ é coeficiente de reflexão para fótons incidentes na segunda reflexão na superfície do labirinto $A_Z$ (assume-se energia de 0,5 MeV);
$A_Z$ é a área (m²) da secção transversal da entrada interna do labirinto projetada na parede do labirinto em perspectiva da barreira primária $A_0$;
$d_h$ é a distância (m) perpendicular entre o alvo e a primeira superfície refletora (igual a distância perpendicular do isocentro à parede, $d_{pp}$);
$d_r$ é a distância (m) entre o centro do feixe até a primeira reflexão, passando pelo final da parede interna do labirinto, e o ponto b na linha central do labirinto;
$d_z$ é a distância (m) da linha central do ponto b à porta do labirinto.

**Tabela C.8** - Valores sugeridos para o coeficiente de reflexão na parede A (Figura C.6) para concreto (NCRP, 2005). Incidência a 0º e 45º para fótons de bremsstrahlung e monoenergéticos. Cada valor apresentado abaixo deve ser multiplicado por $10^{-3}$.

| | **Ângulo de reflexão ou espalhamento em concreto (medido da normal)** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **0º** | | **30º** | | **45º** | | **60º** | | **75º** | |
| ***Incidência*** | ***0º*** | ***45º*** | ***0º*** | ***45º*** | ***0º*** | ***45º*** | ***0º*** | ***45º*** | ***0º*** | ***45º*** |
| 30 MeV | 3,0 | 4,8 | 2,7 | 5,0 | 2,6 | 4,9 | 2,2 | 4,0 | 1,5 | 3,0 |
| 24 MeV | 3,2 | 3,7 | 3,2 | 3,9 | 2,8 | 3,9 | 2,3 | 3,7 | 1,5 | 3,4 |
| 18 MeV | 3,4 | 4,5 | 3,4 | 4,6 | 3,0 | 4,6 | 2,5 | 4,3 | 1,6 | 4,0 |
| 10 MeV | 4,3 | 5,1 | 4,1 | 5,7 | 3,8 | 5,8 | 3,1 | 6,0 | 2,1 | 6,0 |
| 6 MeV | 5,3 | 6,4 | 5,2 | 7,1 | 4,7 | 7,3 | 4,0 | 7,7 | 2,7 | 8,0 |
| 4 MeV | 6,7 | 7,6 | 6,4 | 8,5 | 5,8 | 9,0 | 4,9 | 9,2 | 3,1 | 9,5 |
| Co-60 | 7,0 | 9,0 | 6,5 | 10,2 | 6,0 | 11,0 | 5,5 | 11,5 | 3,8 | 12,0 |
| 0,5 MeV | 19,0 | 22,0 | 17,0 | 22,5 | 15,0 | 22,0 | 13,0 | 20,2 | 8,0 | 18,0 |
| 0,25 MeV | 32,0 | 36,0 | 28,0 | 34,5 | 25,0 | 31,0 | 22,0 | 25,0 | 13,0 | 18,0 |

Esse cálculo se restringe a salas nas quais a razão entre a altura e a largura do labirinto fica entre 1 e 2 (McGinley, 2002) ou quando o valor de [$d_z$/(altura X largura)$^{1/2}$] estiver entre dois e seis (NCRP, 1977). Essa condição pode ser obtida na prática com a colocação de uma travessa (viga) na entrada do labirinto.

Na Tabela C.8 são apresentados os valores sugeridos para o coeficiente de reflexão (NCRP, 2005) em concreto para diferentes ângulos de reflexão - 0º, 30º, 45º, 60º e 75º - em duas direções de incidência da radiação - 0º e 45º - para feixes de raios X de diferentes energias e feixes monoenergéticos.

A radiação de fuga do cabeçote pode atingir a parede $A_1$ e chegar à porta depois de uma única reflexão. Nesse caso a componente da dose (Figura C.7) pode ser dada por (McGinley, 1997):

$$H_{LS} = \frac{L_f W_L U_A \alpha_1 A_1}{\left(d_{\text{sec}} d_{zz}\right)^2} \tag{11}$$

onde,

$H_{LS}$ é a dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida ao espalhamento único da radiação de fuga do cabeçote;

$L_f$ é a razão de fuga de radiação pelo cabeçote a 1 m do alvo (em geral igual a $10^{-3}$, de acordo com a maioria dos fabricantes);

$W_L$ é a carga de trabalho (Gy.semana$^{-1}$) para a radiação de fuga do cabeçote (pode ser diferente do valor de W, em situações especiais de tratamento, como o IMRT);

$U_A$ é o fator de uso para a parede A;

$\alpha_1$ é coeficiente de reflexão para radiação de fuga do cabeçote na parede A;

$A_1$ é a área (m²) da parede A que é vista da porta do labirinto;

$d_{sec}$ é a distância (m) do alvo à linha central do labirinto, na parede A (pode ser medida a partir do isocentro, como valor médio da posição do alvo);

$d_{zz}$ é o comprimento (m) da linha central do labirinto.

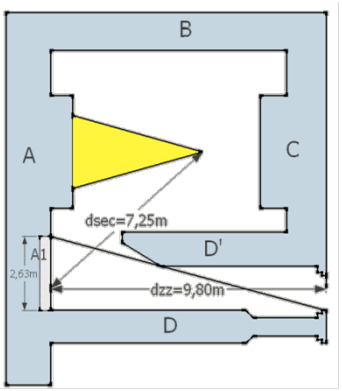



**Figura C.7** - Esquema do labirinto da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando as áreas definidas para a determinação da dose na porta devido ao espalhamento único da radiação de fuga do cabeçote na parede A.

A radiação espalhada no paciente (Figura C.8) que atinge a porta contribui com a dose da seguinte forma (McGinley, 1997):

$$H_{pS} = \frac{a(\theta) W U_A \left(\frac{F}{400}\right) \alpha_1 A_1}{\left(d_{esp} d_{sec} d_{zz}\right)^2} \qquad (12)$$

onde,

$H_{pS}$ é a dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida ao espalhamento da radiação pelo paciente;

$a(\theta)$ é a fração de espalhamento para a radiação espalhada pelo paciente (Tabela C.5) por um ângulo $\theta$;

$W$ é a carga de trabalho (Gy.semana$^{-1}$);

$U_A$ é o fator de uso para a parede A;

$F$ tamanho do campo (m²) a 1 m;

$\alpha_1$ é coeficiente de reflexão para radiação espalhada pelo paciente na parede A;

$A_1$ é a área (m²) da parede A que é vista da porta do labirinto;

$d_{esp}$ é a distância (m) do alvo ao paciente;

$d_{sec}$ é a distância (m) do paciente à linha central do labirinto, na parede A;

$d_{zz}$ é o comprimento (m) da linha central do labirinto.

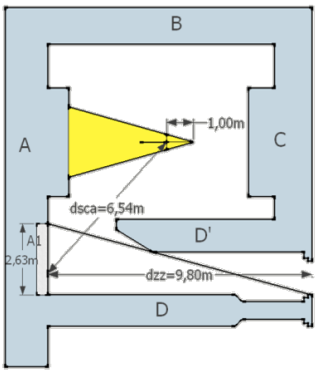



**Figura C.8** - Esquema do labirinto da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando as áreas definidas para a determinação da dose na porta devido ao espalhamento da radiação pelo paciente na parede A.

O coeficiente de reflexão, $\alpha_1$, pode ser obtido da energia média dos fótons espalhados pelo paciente em diversos ângulos, porém um valor conservativo pode ser obtido se uma energia de 0,5 MeV é utilizada para determinar esse coeficiente. Quando a energia do feixe do acelerador for maior do que 10 MeV, a radiação espalhada pelo paciente pode ser ignorada, pois ela se torna insignificante em comparação a gerada pelos nêutrons emitidos do acelerador e os raios gama de captura produzidos pela sua absorção em concreto.

A radiação de fuga que é transmitida através da parede do labirinto (D') que atinge a porta (Figura C.9) contribui para a dose total da seguinte forma:

$$H_{LT} = \frac{L_f W_L U_A B}{(d_L)^2} \tag{13}$$

onde,

$H_{LT}$ é a dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida à radiação de fuga transmitida pela parede interna do labirinto;

$L_f$ é a razão de fuga de radiação pelo cabeçote a 1 m do alvo (em geral igual a $10^{-3}$, de acordo com a maioria dos fabricantes);

$W_L$ é a carga de trabalho (Gy.semana$^{-1}$) para a radiação de fuga do cabeçote (pode ser diferente do valor de W, em situações especiais de tratamento, como o IMRT);

$U_A$ é o fator de uso para a parede A;

B é o fator de transmissão da parede interna do labirinto;

$d_L$ é a distância (m) do alvo à linha central do labirinto no centro da porta.

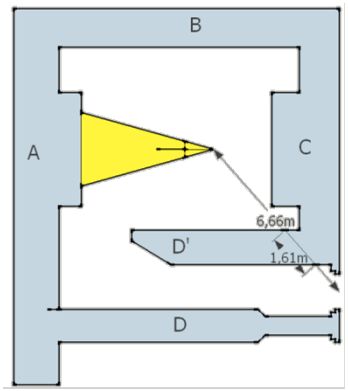



**Figura C.9** - Esquema do labirinto da sala onde está instalado o acelerador do exemplo, mostrando as áreas definidas para a determinação da dose na porta devido à radiação de fuga que atravessa a parede interna do labirinto.

A dose total ($H_A$) na porta do labirinto pode, então, ser dada por:

$$H_A = fH_S + H_{LS} + H_{pS} + H_{LT} \tag{14}$$

O valor da fração de radiação primária transmitida pelo paciente, *f*, tem o valor aproximado de 0,25 para fótons com energia entre 6 MeV e 10 MeV para o campo de radiação de (40 x 40) cm² quando um fantom de (40 x 40 x 40) cm³ é utilizado (McGinley, 1997). Quando o fator de uso é igual a 1/4 para a maioria das direções do feixe (0º, 90º, 180º e 270º), a dose total ($H_{TOT}$) na porta devida a radiação de fuga do cabeçote e a radiação espalhada não é simplesmente 4.$H_G$, e sim (McGinley, 2002):

$$H_{TOT} = 2{,}64 \cdot H_A \tag{15}$$

O fator de transmissão necessário para a blindagem da porta é obtido dividindo-se o limite de dose (P) pela dose total existente do lado externo da porta ($H_{TOT}$).

### *C.3.6.2 Considerações para a produção de nêutrons em aceleradores de partículas de alta energia*

Em instalações de radioterapia com aceleradores de elétrons com energia superior a 10 MeV, nêutrons são produzidos em reações (x,n) e (e,n). A contaminação de nêutrons é produzida por fótons de alta energia e elétrons incidentes principalmente no alvo, colimador primário, filtro achatador do feixe, colimadores secundários e acessórios.

Como a seção de choque para uma reação (x,n) é ao menos uma ordem de grandeza maior do que numa reação (e,n), os nêutrons produzidos num acelerador que produz feixes de raios X são os mais importantes a se considerar. Assim, a energia máxima dos fótons produzidos num acelerador é considerada mais significativa do que a energia máxima do feixe de elétrons, para a determinação da contribuição da dose devida a nêutrons. Os nêutrons podem ativar outros elementos, que permanecem radioativos e contribuem para a exposição à radiação do corpo técnico do serviço de radioterapia que adentra a sala de radiação após o tratamento com feixe de fótons de alta energia. Os radionuclídeos produzidos em componentes ativados possuem meia vida variando de minutos a dias.

Radionuclídeos como o $^{15}O$ (meia-vida de 2 minutos) e o $^{13}N$ (meia-vida de 10 minutos) são produzidos no interior da sala, pela interação dos nêutrons com o ar. A radioatividade no ar produzida nas salas de tratamento pode ser removida por um eficiente sistema de ventilação. Uma ventilação que executa de 6 a 8 trocas por hora do ar da sala, também facilita a remoção de ozônio e outros gases nocivos.

As barreiras primárias e secundárias determinadas para proteção contra a dose devida a fótons protegem também contra a dose devida a elétrons e contaminação de nêutrons. Entretanto, os nêutrons podem chegar à porta da sala tendo perdido pouca energia ao longo do labirinto e podem apresentar um nível de dose inaceitável na área externa da sala, necessitando, assim, de uma porta especialmente projetada.

Um valor de camada deci-redutora recomendado para nêutrons presentes na região de entrada de uma sala de radioterapia é de 45 mm de polietileno borado, acrescida de uma camada de chumbo (6 a 12 mm) necessária para absorver os raios gama produzidos pela reação de captura dos nêutrons nos núcleos do boro.

Uma alternativa para uma porta especialmente blindada para nêutrons é o uso de um labirinto duplo, que pode eliminar a necessidade da porta blindada.

### *C.3.6.3. Aceleradores com energia maior ou igual a 10 MeV*

A dose para fótons espalhados no labirinto de uma sala com um acelerador que produza feixe de fótons de energia maior ou igual a 10 MeV pode ser estimada de acordo com a metodologia do item 3.6.1. No entanto, como a energia média dos raios gama produzidos pela captura de nêutrons no concreto é 3,6 MeV (NCRP, 2005), a blindagem projetada para essa componente é, em geral, também suficiente para blindar os fótons espalhados.

A dose ($h_\varphi$) devido a radiação gama de captura na entrada do labirinto, por unidade de dose absorvida no isocentro é dada por:

$$h_\varphi = K\varphi_A 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \qquad (16)$$

onde,

K é a razão da dose da radiação gama de captura (Sv) pela fluência total de nêutrons no ponto A (Figura C.11). O valor médio geralmente utilizado para esse parâmetro é de $6.9 \times 10^{-16}$ Sv. $m^2$;

$\varphi_A$ é a fluência total de nêutrons ($m^{-2}$) no ponto A por unidade de dose (Gy) de raios X no isocentro;

$d_2$ é a distância (m) entre o ponto A e a porta;

TVD é a distância deci-redutora (m) – cujo valor é de aproximadamente 3,9 para raios X com energia de 15 MeV e de 5,4 m para raios X com energia entre 18 e 25 MeV.

A fluência total de nêutrons na entrada do labirinto (ponto A Figura C.10) por unidade de dose absorvida de raios X no isocentro pode ser determinada por (NCRP, 1984):

$$\varphi_A = \frac{\beta Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5{,}4\beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1{,}3 Q_n}{2\pi S_r} \qquad (17)$$

onde,

β é o fator de transmissão para nêutrons que penetram o cabeçote (1 para blindagem de chumbo e 0,85 para blindagem de tungstênio);

$d_1$ é a distância (m) entre o ponto A e o isocentro,

$Q_n$ intensidade da geração de nêutrons em unidades de nêutrons emitidos do cabeçote por gray de dose absorvida no isocentro;

$S_r$ é a área (m²) total da superfície da sala de tratamento (paredes + teto + piso).

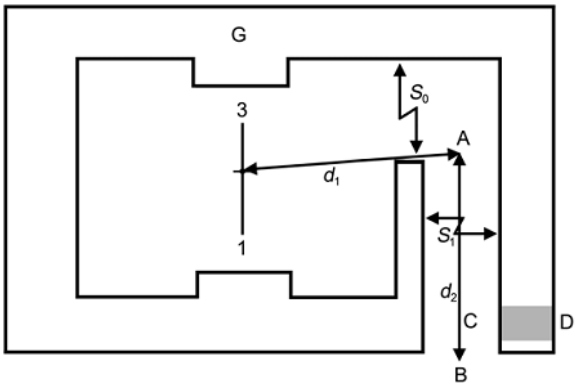



**Figura C.10** - Esquema geral para definição dos parâmetros usados na blindagem da porta do labirinto (NCRP, 2005).

A dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida a radiação gama de captura de nêutrons ($H_{cg}$) é dada por:

$$H_{cg} = W_L h_\varphi \tag{18}$$

onde $W_L$ é a carga de trabalho devida à radiação de fuga do cabeçote.

A porta da sala de um acelerador com energia igual ou maior do que 10 MeV necessita de blindagem para nêutrons além da blindagem para radiação gama. A maior fluência de nêutrons é obtida com os colimadores fechados na entrada do labirinto e se espera que muitos fotonêutrons se originem no cabeçote do acelerador (Kase, 1998; Mao, 1997). O campo de nêutrons no labirinto também é função da angulação do gantry e do plano rotacional do alvo na sala de tratamento (Rebello et al 2010).

A determinação da dose de nêutrons na entrada do labirinto pode ser feita (Wu, 2003) pela seguinte expressão:

$$H_{n,D} = 2{,}4 \cdot 10^{-15} \varphi_A \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \left[ 1{,}64 \cdot 10^{-\left(\frac{d_2}{1{,}9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \right] \tag{19}$$

onde,

$H_{n,D}$ é a dose de nêutrons (Sv) na entrada da sala por unidade de dose absorvida (Gy) no isocentro;

$\varphi_A$ é a fluência de nêutrons (m$^{-2}$) por unidade de dose absorvida (Gy) de raios X no isocentro;

$S_0/S_1$ é a razão entre a área da secção de entrada do labirinto pela área da secção ao longo do labirinto (Figura C.10);

TVD é a distância deci-redutora (m) que varia na raiz quadrada da área da secção transversal ao longo do labirinto ($S_1$):

$$TVD = 2{,}06 \cdot \sqrt{S_1} \tag{20}$$

A dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida aos nêutrons ($H_n$) é dada por:

$$H_n = W_L H_{n,D} \tag{21}$$

onde $W_L$ é a carga de trabalho devida à radiação de fuga do cabeçote.

Finalmente, a dose semanal total na porta do labirinto é dada por:

$$H_W = H_{TOT} + H_{cg} + H_n \tag{22}$$

Para muitos labirintos $H_{TOT}$ é uma ordem de grandeza menor do que a soma de $H_{cg}$ e $H_n$, podendo ser desprezada.

**Exemplo**

**Barreira secundária - Porta**

A porta da sala de tratamento está em área supervisionada com ocupação eventual de IOE e pacientes com fator de ocupação igual a 1/8. O feixe de fótons com energia de 15 MeV do acelerador em estudo, contribui, na porta da sala, com as seguintes componentes:

a) **a radiação primária espalhada na parede A, $H_S$**

De acordo com os parâmetros propostos, a equação 10 leva a

$$H_S = \frac{W U_A \alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{(d_h d_r d_z)^2} = \frac{1000 \cdot 1/4 \cdot 3{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}0 \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}0}{(4{,}6 \cdot 5{,}2 \cdot 7{,}3)^2}$$

$$\therefore\ H_S = \frac{0{,}18}{2{,}9 \cdot 10^6} = 6{,}3 \cdot 10^{-8}\ \text{Sv/sem}$$

onde os valores dos parâmetros utilizados estão relacionados abaixo (Figura C.7):

W 1000 (Gy.semana$^{-1}$);
$U_A$ ¼ para a parede A;
$\alpha_0$ 3,4 x $10^{-3}$, coeficiente de reflexão para incidência normal e reflexão a $45^0$, interpolado para 15 MV;
$A_0$ 3,0 (m²);
$\alpha_z$ 8,0 x $10^{-3}$, coeficiente de reflexão para incidência normal e reflexão a $75^0$, para 0,5 MeV;
$A_Z$ 9,0 (m²);
$d_h$ 4,6 (m);
$d_r$ 5,2 (m);
$d_z$ 7,3 (m).

**b) a radiação de fuga do cabeçote espalhada pela parede secundária A, $H_{LS}$**

De acordo com os parâmetros propostos, a equação 11 leva a

$$H_{LS} = \frac{L_f W_L U_A \alpha_1 A_1}{(d_{sec} d_{zz})^2} = \frac{10^{-3} \cdot 1000 \cdot 1/4 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}5}{(7{,}3 \cdot 9{,}8)^2}$$

$$\therefore H_{LS} = \frac{0{,}0054}{5{,}1 \cdot 10^3} = 1{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/sem}$$

onde os valores dos parâmetros utilizados estão relacionados abaixo (Figura C.7):

$L_f$ $10^{-3}$;
$W_L$ 1000 (Gy.semana$^{-1}$);
$U_A$ ¼ para a parede A;
$\alpha_1$ 4,8 x $10^{-3}$, coeficiente de reflexão para incidência a $45^0$ e reflexão normal, interpolado para 15 MV;
$A_1$ 4,5 (m²);
$d_{sec}$ 7,3 (m);
$d_{zz}$ 9,8 (m).

**c) a radiação espalhada pelo paciente e pela parede secundária A, $H_{pS}$**

De acordo com os parâmetros propostos, a equação 11 leva a

$$H_{pS} = \frac{a(\theta) W U_A \left(\frac{F}{400}\right) \alpha_1 A_1}{(d_{esp} d_{sec} d_{zz})^2} = \frac{2{,}85 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 1/4 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}5}{(1{,}0 \cdot 6{,}5 \cdot 9{,}8)^2}$$

$$H_{pS} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-2}}{4{,}1 \cdot 10^3} = 3{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/sem}$$

onde os valores dos parâmetros utilizados estão relacionados abaixo:

$a(\theta)$ 2,85 x $10^{-3}$, interpolado para 300 e 15 MV;
W 1000 (Gy.semana$^{-1}$);
$U_A$ ¼ para a parede A;
F 400 (m²);
$\alpha_1$ 4,8 x $10^{-3}$, coeficiente de reflexão para incidência a $45^0$ e reflexão normal, interpolado para 15 MV;
$A_1$ 4,5 (m²);
$d_{esp}$ 1 (m);
$d_{sec}$ 6,5 (m);
$d_{zz}$ 9,8 (m).

**d) a radiação que atravessa o labirinto, $H_{LT}$**

$$H_{LT} = \frac{L_f W_L U_A B}{(d_L)^2} = \frac{10^{-3} \cdot 1000 \cdot 1/4 \cdot 0{,}0002}{6{,}7^2}$$

$$H_{LT} = 1{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/sem}$$

onde os valores dos parâmetros utilizados estão relacionados abaixo (Figura C.9):

$L_f$ $10^{-3}$;
$W_L$ 1000 (Gy.semana$^{-1}$);
$U_A$ ¼ para a parede A;
B 0,0002 (2 TVL's);
$d_L$ 6,7.

A dose total ($H_A$) na porta da sala será então, de acordo com a equação (14):

$$\begin{aligned} H_A &= fH_S + H_{LS} + H_{pS} + H_{LT} \\ &= 0{,}25 \cdot 6{,}3 \cdot 10^{-8} + 1{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-6} \\ &\approx 6{,}0 \mu Sv / sem \end{aligned}$$

Portanto, de acordo com a equação (15), a dose total ($H_{TOT}$) na porta será:

$$H_{TOT} = 2{,}64 \cdot H_A = 15{,}8 \mu Sv / sem$$

**e) fotoneutrons espalhados, produzidos no interior da sala, $H_{n,D}$**

$$H_{n,D} = 2{,}4 \cdot 10^{-15} \varphi_A \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \left[ 1{,}64 \cdot 10^{-\left(\frac{d_2}{1{,}9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \right]$$

$$H_{n,D} = 2{,}4 \cdot 10^{-15} \cdot 6{,}5 \cdot 10^{9} \cdot 1{,}1 \cdot \left[ 1{,}64 \cdot 10^{-\left(\frac{9{,}0}{1{,}9}\right)} + 10^{-\left(\frac{9{,}0}{5{,}9}\right)} \right] = 1{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-2}$$

$$= 5{,}1 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/Gy}$$

onde os valores dos parâmetros utilizados estão relacionados abaixo:

$d_2$ = 9,0 m;
$\varphi_A$= 6,5 x $10^9$ n/m$^2$,
$S_0/S_{1=}$ (9,0/8,2) = 1,1,
TVD= 5,9 m.

A dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida aos nêutrons ($H_n$) é dada pela equação (21):

$$H_n = W_L H_{n,D} = 5{,}1 \cdot 10^{-4} \text{Sv/sem}$$

f) **radiação gama de captura produzida por nêutrons, $H_{cg}$**

$$h_{\varphi} = K\varphi_A 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} = 6{,}9 \text{ x } 10^{-16} \cdot 6{,}5 \text{ x } 10^{9} \cdot 10^{-9/5{,}9}$$
$$= 1{,}3 \cdot 10^{-7}\, Sv/Gy$$

onde,

K= 6,9 x $10^{-16}$ Sv. $m^2$;
$\varphi_A$= 6,5 x $10^9$ n/$m^2$;
$d_2$= 9,0 m;
TVD= 5,9 m.

A dose semanal (Sv.semana$^{-1}$) na porta devida aos raios gama de captura ($H_{cg}$) é dada pela fórmula (18):

$$H_{cg} = W_L h_{\varphi} = 1{,}3 \cdot 10^{-4}\, Sv/sem$$

Finalmente, a dose semanal total na porta do labirinto é dado pela equação (22):

$$H_W = H_{TOT} + H_{cg} + H_n$$
$$= 15{,}8 \cdot 10^{-6} + 1{,}3 \cdot 10^{-4} + 5{,}1 \cdot 10^{-4}$$
$$= 6{,}6 \cdot 10^{-4}\, Sv/sem$$

onde somente a dose de nêutrons contribui com 77% para a dose total.

### C.3.7. Otimização das barreiras

O cálculo da espessura de cada barreira deve ser repetido aplicando-se valores cada vez mais baixos de dose até que seja encontrado um nível tão baixo quanto razoavelmente exequível (ALARA). Assim, a menos que solicite especificamente, a demonstração de otimização de uma barreira é dispensável quando o projeto assegura que, em condições normais de operação, sejam atendidas as três condições:

a) a dose efetiva para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) não excede *1 mSv.ano$^{-1}$*;
b) a dose efetiva para indivíduos do público não excede *1 mSv.ano$^{-1}$*e
c) a dose efetiva coletiva não excede a *1 homem-sievert.ano$^{-1}$*.

Para se calcular a espessura otimizada da blindagem deve-se fazer uma análise dos custos de incremento de barreira. O método fornecido pelo ICRP-33 sugere a seguinte sequência de cálculo:

1) Calcular a barreira mínima correspondente ao limite primário individual, para garantir que os valores otimizados (que consideram doses coletivas) não resultem em doses individuais acima dos limites primários (*1 mSv.ano$^{-1}$* para área livre e *20 mSv.ano$^{-}$1* para área controlada) para os indivíduos mais expostos.

2) Calcular a barreira *máxima* correspondente ao nível de isenção de otimização dado pelo organismo regulador (CNEN, 2011) de *1 mSv.ano*$^{-1}$ para indivíduos ocupacionalmente expostos, IOE, e *10 μSv.ano*$^{-1}$ para indivíduos do público. O valor *ótimo* da barreira deve estar entre este *máximo* e o valor mínimo obtido no item 1.
3) Estimar os custos incrementais para várias barreiras nessa faixa, por exemplo, acrescentando uma camada semi-redutora ou deci-redutora (redução para ½ ou 1/10 do limite, respectivamente). Deve-se levar em conta o custo dessa redução, que é, aproximadamente, o custo da mão de obra e do concreto adicionado (entre US$ 200 a 600 por m³). Recomenda-se a consulta ao engenheiro responsável pela construção.
4) Para cada valor de espessura incremental, calcular a redução da dose coletiva (*S*), considerando-se o tempo de vida da instalação ($T_v$) e o número de pessoas (*n*) protegidas durante o esse período. A redução na dose coletiva é dada por:

$$S = \Delta H \cdot n \cdot T_v \tag{23}$$

ΔH é a diferença entre a dose efetiva e a dose efetiva otimizada. Para exemplificar, considere-se uma área ocupada em tempo integral (8 h.dia$^{-1}$ *x* 5 dias.semana$^{-1}$ *x* 50 semanas.ano$^{-1}$) por quatro IOE durante 20 anos de vida de uma instalaçao. Com uma camada deci-redutora a dose individual será reduzida de *20 mSv.ano*$^{-1}$ para *2 mSv.ano*$^{-1}$ e a dose coletiva será reduzida de 1,6 Sv para 0,16 Sv, ou seja, seriam evitados 1,44 Sv durante esse tempo.

Note-se neste exemplo que quatro IOE em tempo integral correspondem a oito IOE em meio período ou a cem pessoas ocupando a mesma área em dez dias úteis por ano. Recomenda-se assim fazer uma estimativa realista da ocupação da área, mas na ausência de garantias desses valores, devem-se usar valores superestimados. Considerar ainda que as doses individuais possam ser diferentes devido à localização e permanência dos indivíduos, pois a dose coletiva é a soma das doses de todos os indivíduos expostos, após a barreira.

5) Para cada incremento da barreira, dividir o custo calculado para a obra pela dose coletiva evitada. O valor *ótimo* será atingido quando se obtiver *10.000,00 US$.(homem.sievert)*$^{-1}$ (CNEN, 2011).

Por este roteiro, o fator de transmissão otimizado é dado por:

$$B_{otim} = \frac{A \cdot C \cdot TVL_{mat}}{(\ln 10) \cdot \alpha \cdot n \cdot T_{vida} \cdot H_{tot}} \tag{24}$$

onde,

A é a área da barreira deci-redutora (m²);
TVL é a espessura da barreira deci-redutora (m);
C é o custo de uma camada deci-redutora de concreto (US$.m$^{-3}$);
α é o custo do detrimento por unidade de dose coletiva (10.000 US$.(homem.sievert)$^{-1}$);
n é o número de IOE ocupando a área por período de tempo (homem.semana$^{-1}$);
$T_v$ é o tempo de vida útil da instalação (semanas);

$H_{tot}$ é a dose existente na ausência da barreira (Sv.semana$^{-1}$).

Note-se que no cálculo da otimização não se deve levar em consideração o custo inicial da barreira, ou seja, antes da otimização.

**Exemplo**

**Barreira primária – C**

A parede C delimita a sala de tratamento e o painel de comando do acelerador. Nessa região, 2 técnicos atuam durante o horário de trabalho do acelerador, em tempo integral durante uma semana. Em geral, 3 técnicos trabalham em regime de 2 turnos, 2 técnicos por turno (n = 4 *(1/2) = 2).

Considerando o cinturão primário com largura L de 4,5 m (veja exercício 4) e altura h de 3,5 m, a área da barreira deci-redutora é dada por:

$$A = L \cdot h = 4{,}5 \cdot 3{,}5 = 15{,}75\, m^2$$

A espessura da barreira deci-redutora, conforme visto anteriormente, é de 0,44 m. Uma instalação de radioterapia é calculada para um tempo de vida útil de 20 anos considerando-se 52 semanas anuais, assim $T_v$ = 1040 semanas. O custo de uma camada deci-redutora em concreto é da ordem de 420 US$.m$^{-3}$.

A dose semanal, na ausência da barreira é dado por:

$$H_{tot} = \frac{W \cdot U}{d_{pri}^2} = \frac{1000 \cdot 1/4}{6{,}7^2} = 5{,}57\, Sv \cdot semana^{-1}$$

Dessa forma o fator de transmissão otimizado para essa barreira é:

$$B_{otim} = \frac{15{,}75 \cdot 420 \cdot 0{,}44}{(\ln 10) \cdot 10000 \cdot 2 \cdot 1040 \cdot 5{,}57} = 1{,}09 \cdot 10^{-5}$$

O número de camadas deci-redutoras é:

$$N_{TVT} = -\log(B) = -\log(1{,}09 \cdot 10^{-5}) = 4{,}96$$

A espessura da barreira é dada por:

$$S = TVL_1 + (N_{TVL} - 1) \cdot TVL_2 = 0{,}44 + (4{,}96 - 1) \cdot 0{,}41 = 2{,}07 \cong 2{,}1\, m$$

Comparando-se com o valor obtido anteriormente de 1,85 m, conclui-se que a barreira deverá ter a espessura de 2,1 m para garantir que a dose no ponto não é superior aos limites permitidos.

## C.4. EXERCÍCIOS

1. Mostre que, para feixes de raios X e radiação gama, a transmissão pode ser dada, a partir da lei de atenuação [$I = I_o.exp(-\mu.x)$] em termos do número de camadas deci-

redutoras ($N_{TVL}$) do material de blindagem necessárias para atingir o nível de proteção desejado, por:

$$N_{TVL} = -\log_{10}(B) = \log(1/B)$$

2. Considerar o exemplo dado no texto para calcular a espessura da barreira secundária C.
   Resp. 0,7 m.

3. Considerar o exemplo dado no texto para calcular a espessura da barreira secundária do teto.
   Resp. 0,8 m.

4. Considerar o exemplo dado no texto para determinar a largura do cinturão primário.
   Resp. 4,5 m.

5. Calcular as espessuras para as barreiras, considerando-se o princípio de otimização e comparar com os valores encontrados pelo cálculo de limitação de dose.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Comissão Nacional de Energia Nuclear, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, Norma NN-3.01, Rio de Janeiro, 2011.

Comissão Nacional de Energia Nuclear, Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica de Serviços de Radioterapia - Resolução 130/2012, Rio de Janeiro, D.O.U. 04 de junho de 2012.

Facure, A., Silva, A, X. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design, App. Radiat. and Istotop., 65, 1023-1028, 2007.

Guidelines for Radiotherapy Treatment Rooms Design, IEC 61859, 1997.

Institute of Physics and Engineering in Medicine, The Design of Radiotherapy Treatment Room Facilities (STEDEFORD, B., MORGAN, H.M., MAYLESS, W.P.M., Eds), IPEM, York, United Kingdom, 1997.

International Council on Radiation Protection, Protection against radiation from external sources used in medicine. ICRP Publication n 33, 1982.

Kase, K.R., Mao, X.S., Nelson, W.R., Liu, J.C., Keck, J.H. and Elsalim, M., Neutron fluence and energy spectra around the Varian Clinac 2100C/2300C medical accelerator, Health Phys, 74(1), 38-47, 1998.

López, P.O., Rajan, G., Podgorsak, E.B., General Shielding Calculations, Radiation Oncology Physics: A handbook for teachers and students, Cap. 16, IAEA, Viena, 2005.

Mao, X.S., Kase, K.R., Liu, J.C., Nelson, W.R., Keck, J.H. and Johnsen, S., Neutron sources in the Varian Clinac 2100C/2300C medical accelerator calculated by the EGS4 code, Health Phys, 72(4), 524-529, 1997.

McGinley, P. H. and James, J.K., Maze design methods for 6- and 10-MeV accelerators, Radiat. Prot. Manage. 14(1), 56-64, USA, 1997.

McGinley, P. H., Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities, Medical Physics Publishing, USA, 2002.

Mota, H.C., Formalismo de cálculo de blindagem de instalações de radioterapia, Anais da Jornada da ABFM, Rio de Janeiro, p. 20-31.

National Council on Radiation Protection and Measurements, Structural shielding design and evaluation for medical use of X rays and gamma rays of energies up to 10 MeV, Washington DC: NCRP, NCRP Report 49, 1976.

___, Radiation protection design guidelines for 0.1 MeV-100 MeV particle accelerator facilities, Washington DC: NCRP, NCRP Report 51, 1977.

___, Neutron contamination from medical accelerators. Bethesda, MD: NCRP, NCRP Report 89, 1984.

___, Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities, Washington DC: NCRP, NCRP Report 151, 2005.

Neutron source strength measurements for Varian, Siemens, Elekta and General Electric linear accelerators. J. Appl. Clin. Med. Phys, 4(3):189-194, 2003.

Profio, E.A., Radiation shielding and dosimetry. New York: John Wiley & Sons, 1979.

Rebello, W.F.; Silva. A.X; Facure, A. Roque, H. Monte Carlo simulation of photoneutrons streaming inside radiotherapy treatment rooms as a function of gantry angles. Progress in Nuclear Energy (52), p. 278-281, 2010.

Wu, R.K and McGinley, P.H., Neutron and capture gamma along the mazes of linear accelerator vaults, J. Appl. Clin. Med. Phys, 4(2), 162-171, 2003.