

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO
TRABALHO**

ESEQUIEL BIASI RODRIGUES

**ALTERNATIVAS DE PROJETO DE *BUNKER* PARA GAMAGRAFIA
INDUSTRIAL OBJETIVANDO A OTIMIZAÇÃO DA RADIOPROTEÇÃO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2016

ESEQUIEL BIASI RODRIGUES

**ALTERNATIVAS DE PROJETO DE *BUNKER* PARA GAMAGRAFIA
INDUSTRIAL OBJETIVANDO A OTIMIZAÇÃO DA RADIOPROTEÇÃO**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Cesar Lucio Molitz
Allenstein

CURITIBA

2016

ESEQUIEL BIASI RODRIGUES

**ALTERNATIVAS DE PROJETO DE BUNKER PARA GAMAGRAFIA
INDUSTRIAL OBJETIVANDO A OTIMIZAÇÃO DA
RADIOPROTEÇÃO**

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientador:

Prof. Msc. Cesar Lúcio Molitz Allenstein
Professor do CEEST, UTFPR – Campus Curitiba.

Banca:

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Prof. Dr. Adalberto Matoski
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Prof. M.Eng. Massayuki Mário Hara
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Curitiba
2016

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por iluminar e me conduzir nos caminhos certos.

Ao Prof. Cesar Lúcio Molitz Allenstein da UTFPR, pela orientação do trabalho, sugestões, contribuições e imediata disposição para apontar melhorias na realização do mesmo.

À Camila Bianco, por ter incentivado a cursar esta Especialização, e pelas interessantes discussões técnicas.

Aos amigos conquistados nesta jornada, em especial Letícia Franco, Patrícia Dovihiy e Felipe Nogueira.

E a todos que de uma forma ou de outra, colaboraram para a execução deste trabalho.

“No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade.”

Albert Einsten

RESUMO

BIASI RODRIGUES, Esequiel. **Alternativas de projeto de *bunker* para gamagrafia industrial objetivando a otimização da radioproteção.** 2016. 71 páginas. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho trata do dimensionamento de blindagens para instalações de gamagrafia industrial, também conhecidas como *bunkers*. Tendo como objetivo a otimização da radioproteção para uma fonte de irídio 192 com atividade de 60 Ci, são apresentadas algumas opções de projetos de *bunker*. Vantagens e desvantagens de cada uma são mostradas e comparadas em uma tabela. Como resultado, é proposta uma instalação com blindagem simplificada, a qual utiliza aço e água como elementos atenuadores das radiações gama. Conclui-se que esta é a melhor opção para instalação de caráter provisório, devido às características como espessura do aço reduzida (paredes de 12,5mm), facilidade de montagem e custo.

Palavras-chave: proteção radiológica. blindagem para raios gama. projeto de *bunker* para gamagrafia.

ABSTRACT

BIASI RODRIGUES, Esequiel. **Design alternatives for industrial gammagraphy bunkers with focus on radiation protection optimization.** 2016. 71 pages. Course thesis (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2016.

This work deals with shielding dimensioning for industrial gammagraphy installations, also known as bunkers. There are presented some options of bunker design, with the objective of radioprotection, considering a gamma source of iridium 192 with 60 Ci activity. Advantages and disadvantages of each one are shown and compared in a table. As result, it is proposed a simplified shielding, which uses steel and water as attenuators of gamma radiation. It is concluded that this is the best option for provisory installations, due to characteristics such as reduced thickness of the steel wall (12.5mm), easiness of assemblage and cost.

Keywords: radiation protection. gamma rays shielding. gammagraphy *bunker* design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Técnica de ensaio radiográfico	18
Figura 2 – Exemplos de técnicas de inspeção de soldas.....	18
Figura 3 – Esquema de funcionamento do irradiador para gamagrafia.....	20
Figura 4 – Fonte radioativa selada e componentes de interface.....	21
Figura 5 – Esquema de separação das radiações alfa, beta e gama.....	24
Figura 6 – Representação da emissão da radiação γ pelo núcleo.....	24
Figura 7 – Gráfico do valor de “a” em função da energia da radiação (esquerda)	31
Figura 8 – Gráfico do valor de “b” em função da energia da radiação (direita)	31
Figura 9 – Vista de cima do <i>bunker</i> semi-enterrado.....	42
Figura 10 – Vista em corte do <i>bunker</i> semi-enterrado	43
Figura 11 – Posicionamentos da fonte para cálculo de exposição (Leste-Oeste).....	44
Figura 12 – Posicionamento da fonte para cálculo de exposição (Norte-Sul)	45
Figura 13 – Vista em corte do <i>bunker</i> de superfície (paredes de concreto).....	49
Figura 14 – Vista de cima do <i>bunker</i> de superfície (paredes de concreto)	50
Figura 15 – Vista em corte do <i>bunker</i> de superfície (parede composta).....	58
Figura 16 – Vista de cima do <i>bunker</i> de superfície (parede composta)	59
Figura 17 – Considerações para cálculo da parede composta	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de doses anuais	35
Tabela 2 – Taxa de exposição para as paredes Leste, Oeste e Norte.....	46
Tabela 3 – Taxa de exposição para a parede Sul.....	46
Tabela 4 – Custos de construção com paredesão do <i>bunker</i> semi-enterrado	47
Tabela 5 – Custos de construção do <i>bunker</i> de superfície de concreto.....	53
Tabela 6 – Custos de construção do <i>bunker</i> de superfície com paredes de aço	56
Tabela 7 – Custos de construção do <i>bunker</i> de superfície de parede composta	63
Tabela 8 – Comparativo entre as diversas características dos projetos propostos...	66

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Drawing</i> , ou desenho assistido por computador
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
HLV	<i>Half Layer Value</i> , ou Camada Semi-Redutora
NCRP	<i>National Council on Radiation Protection & Measurements</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
TLV	<i>Tenth Layer Value</i> , ou Camada Deci-Redutora
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
PPR	Plano de Proteção Radiológica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	16
2.2 A INSPEÇÃO ATRAVÉS DE GAMAGRAFIA.....	17
2.2.1 Fontes Radioativas Utilizadas em Gamagrafia	20
2.2.2 Características do irídio 192	22
2.3 CONCEITOS DE RADIOATIVIDADE.....	23
2.3.1 Decaimento Gama (γ).....	24
2.4 RADIOPROTEÇÃO.....	25
2.4.1 Tempo de Exposição	25
2.4.2 Distância	25
2.4.3 Blindagem.....	26
2.4.3.1 Cálculo de blindagem para raios gama.....	27
2.4.3.2 Camada semi-redutora (HLV)	28
2.4.3.3 Camada deci-redutora (TLV)	29
2.4.3.4 Fator de redução ou atenuação	29
2.4.3.5 Fator de “ <i>build up</i> ” (ou fator de crescimento)	30
2.5 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS E DOSIMETRIA.....	31
2.5.1 Atividade	31
2.5.2 Exposição	32
2.5.3 Dose Efetiva.....	32
2.5.4 Relação entre Taxa de Exposição e Atividade	33
2.5.5 Relação entre Exposição e Dose Equivalente	33
2.5.6 Legislação e Dosimetria.....	34
2.5.7 Classificação das Áreas.....	36
2.5.7.1 Áreas controladas	36
2.5.7.2 Áreas supervisionadas.....	37
2.5.7.3 Áreas livres	37
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 FONTE RADIOATIVA	38
3.2 CARACTERÍSTICAS DO <i>BUNKER</i>	39
3.2.1 Áreas de Atividade.....	40

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 <i>BUNKER</i> SEMI-ENTERRADO.....	41
4.1.1 Layout da Área.....	41
4.1.2 Cálculos de Espessura das Paredes	43
4.1.2.1 Cálculo da taxa de exposição	44
4.1.3 Relação de custos	47
4.1.4 Outros aspectos.....	48
4.2 <i>BUNKER</i> DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES DE CONCRETO.....	48
4.2.1 Layout da área	48
4.2.2 Cálculos de blindagem e espessura das paredes.....	50
4.2.2.1 Cálculo da espessura da parede de concreto com uso de colimador	51
4.2.2.2 Cálculo da espessura da parede de concreto sem uso de colimador	52
4.2.3 Relação de custos	53
4.3 <i>BUNKER</i> DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES DE AÇO.....	54
4.3.1 Cálculos de blindagem e espessura das paredes.....	54
4.3.1.1 Cálculo da espessura da parede de aço com uso de colimador	55
4.3.1.2 Cálculo da espessura da parede de aço sem uso de colimador	55
4.3.2 Relação de Custos.....	56
4.4 <i>BUNKER</i> DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES COMPOSTAS	57
4.4.1 Layout da Área.....	57
4.4.2 Cálculos de Blindagem e Espessura das Paredes	59
4.4.2.1 Cálculo da espessura da parede de água com uso de colimador	60
4.4.2.2 Cálculo da espessura da parede de água sem uso de colimador	62
4.4.3 Relação de Custos.....	63
4.5 ANÁLISE COMPARATIVA.....	64
5 CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A radiografia industrial é uma técnica de ensaios não destrutivos muito utilizada nas áreas da mecânica, energia, petroquímica e aeroespacial, pois possibilita resultados num tempo relativamente curto e sem alterar as características do objeto de teste (HELLIER, 2003). A radiografia industrial pode ser de dois tipos: através de raios-X e por raios gama. Com a utilização desta técnica, é possível inspecionar peças no que diz respeito à penetração de solda em juntas, porosidade e vazios no interior do material, defeitos de soldagem, trincas e pontos de corrosão. Pode-se utilizar este tipo de ensaio em laboratório e em campo, desde que respeitadas às devidas medidas de proteção radiológica.

Um dos aspectos mais importantes relacionados a este tipo de ensaio não destrutivo diz respeito à proteção do trabalhador e pessoas nas imediações do local de inspeção. Devem-se seguir uma série de recomendações para que estes indivíduos recebam a menor dose possível.

No Brasil, atualmente existem em funcionamento 85 instalações de radiografia industrial autorizadas, segundo controle da CNEN (2016). A atividade de gamagrafia é regulada e deve seguir as diretrizes de proteção radiológica conforme norma CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014a), medidas de segurança de operação do equipamento conforme CNEN NE 3.02 (CNEN, 1988), licenciamento de instalações radioativas conforme CNEN NE 6.02 (CNEN, 2014b) e requisitos de funcionamento de serviços de radiografia industrial conforme CNEN NN 6.04 (CNEN, 2013). Em termos gerais, estes requisitos se traduzem em limitação de dose, através de três fatores: tempo de exposição, distância e blindagem.

Este trabalho tem foco na proteção dos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) – representados por trabalhadores que operam a gamagrafia industrial e também nos indivíduos do público, no que diz respeito a barreiras para atenuação de radiações ionizantes. As blindagens são consideradas como fator primário no projeto e construção de instalações para este tipo de ensaio.

Dependendo de características da fonte radioativa para a gamagrafia, como atividade e energia de radiação, são necessárias barreiras que podem chegar a espessuras da ordem de metros, para determinados materiais. Deste modo, é de fundamental importância considerar os aspectos econômicos e comparar alternativas de construção para que o melhor projeto seja implementado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor e analisar algumas propostas de projeto de *bunkers* para gamagrafia, sob o ponto de vista de proteção do trabalhador, levando em conta a relação entre o custo e o melhor benefício a ser alcançado em radioproteção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Apresentar o método de cálculo para determinação da espessura de blindagem, que propiciem doses resultantes em conformidade com a legislação vigente;
- Identificar soluções de projeto alternativas, que por sua simplicidade, possam diminuir o custo de construção;
- Propor um quadro comparativo com vantagens e desvantagens de cada uma, que pode fornecer subsídios a uma organização no momento de projetar ou reformar determinada instalação.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Visando a preservação da saúde e integridade dos trabalhadores em atividades de gamagrafia, é importante determinar corretamente os níveis de proteção radiológica de uma instalação. Um dos principais fatores de proteção, a blindagem deve ser projetada e construída com materiais e espessuras que atenuem a intensidade de radiação para níveis seguros, conforme normas vigentes: CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014a), CNEN NE 3.02 (CNEN, 1988), CNEN NE 6.02 (CNEN, 2014b) e CNEN NN 6.04 (CNEN, 2013).

A atividade de radiografia industrial necessita de um investimento elevado, em termos de equipamentos e instalações. É um dos custos principais das

instalações é a blindagem radioativa. É necessária uma análise das possibilidades de construção e vantagens e desvantagens de cada uma, para que a relação custo benefício seja a melhor para o trabalhador e para o empregador, assegurando, para tanto, a saúde humana.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é estruturado em 6 capítulos:

Capítulo 1: apresenta uma introdução, delimitação do tema, objetivo geral e específicos do estudo e a justificativa da importância do trabalho.

Capítulo 2: aborda uma revisão bibliográfica, com conceitos de ensaios não destrutivos, atividade de gamagrafia, conceitos de física nuclear, radioatividade e proteção radiológica.

Capítulo 3: consiste na descrição do estudo de caso.

Capítulo 4: apresenta os resultados e discussões do trabalho, com características de cada tipo de construção de *bunkers* para gamagrafia industrial.

Capítulo 5: de uma forma conclusiva, mostra as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 6: para finalizar, são listadas as referências bibliográficas consultadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos, segundo HELLIER (2003), compreendem um amplo grupo de métodos utilizados na indústria para avaliação de propriedades e características de um material, componente ou sistema, sem que se causem danos ao mesmo. Essa é a grande vantagem destas técnicas, pois economizam tempo e dinheiro na análise, pesquisa e resolução de problemas. Os métodos mais comuns de ensaios não destrutivos convencionais são aqueles que aplicam as técnicas de uso do ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, correntes parasitas e radiografia industrial, conforme FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO (2007).

Ainda, segundo HELLIER (2003), existe uma grande variedade de aplicações para estas técnicas, que geralmente são empregadas na inspeção de algum componente onde sua falha pode causar risco de segurança ou prejuízo, como em equipamentos de transporte, vasos de pressão, estruturas, tubulações, etc. Conforme HELLIER (2003), podem-se listar algumas destas aplicações:

- Inspeção de soldas: durante a fabricação, as soldas podem apresentar características fora das especificações de uma junta, como espessura, presença de vazios, porosidades ou descontinuidades, etc. As soldas podem ser inspecionadas através de radiografia industrial (raios-X ou gamagrafia), ultrassom, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, etc;
- Inspeção de chapas: componentes em serviço podem falhar devido à diminuição da espessura resistente causada por fenômenos de corrosão. Podem ser inspecionados no campo através da radiografia industrial ou ultrassom, que ajudam a detectar pontos com diferenças de espessuras;
- Inspeção de peças de fundição ou forjadas: tal como para juntas soldadas, nestes processos industriais existe a possibilidade de ocorrência de defeitos de fabricação, como vazios, porosidades ou trincas. Geralmente utilizam-se os mesmos métodos de testes para inspeção.

2.2 A INSPEÇÃO ATRAVÉS DE GAMAGRAFIA

Segundo ANDREUCCI (2014), a gamagrafia é uma técnica de ensaio não destrutivo que visa analisar componentes de tamanho pequeno ou grande, que necessitam de alto desempenho e segurança na operação. A inexistência de falhas internas é verificada por meio de raios gama, devido às características de grande penetração que permitem obter imagens fotográficas de falhas através das radiações penetrantes, que incidem um filme fotográfico no lado oposto ao posicionamento de uma fonte radioativa. Conforme HELLIER (2003), esta técnica é utilizada para controle de qualidade de componentes soldados na indústria química, nuclear e mecânica, em aplicações como tubulações, componentes de turbomotores, vasos de pressão, reservatórios, estruturas aeronáuticas, componentes de satélites, etc.

No ensaio por gamagrafia, determinada peça é exposta a radiação penetrante. Diferenças de densidade ou variações de espessura do material, ou variações de características de absorção devido às variações da composição do material, causam diferenças na absorção de radiação do material (ANDREUCCI, 2014; HELLIER, 2003; IAEA, 1992). Estas diferenças são evidenciadas na impressão de um filme fotográfico ou outro meio de registro, e indicam a existência de defeito no material ou descontinuidades (trincas, vazios, etc). Uma representação do funcionamento da radiografia industrial (raios-X ou gamagrafia) é mostrada na Figura 1, conforme ANDREUCCI (2014). Também, são apresentadas algumas formas de inspeção de soldas na Figura 2, conforme HELLIER (2003).

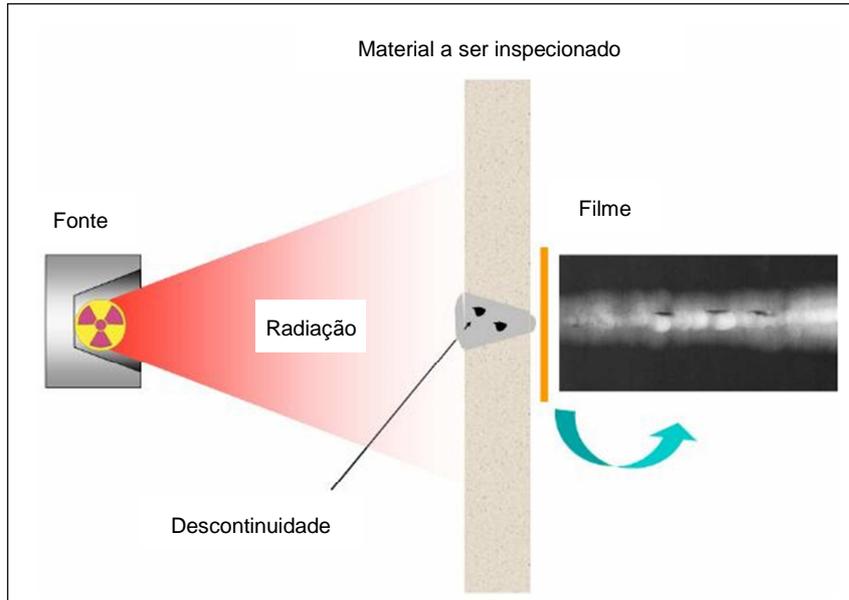


Figura 1 – Técnica de ensaio radiográfico
Fonte: ANDREUCCI (2014)

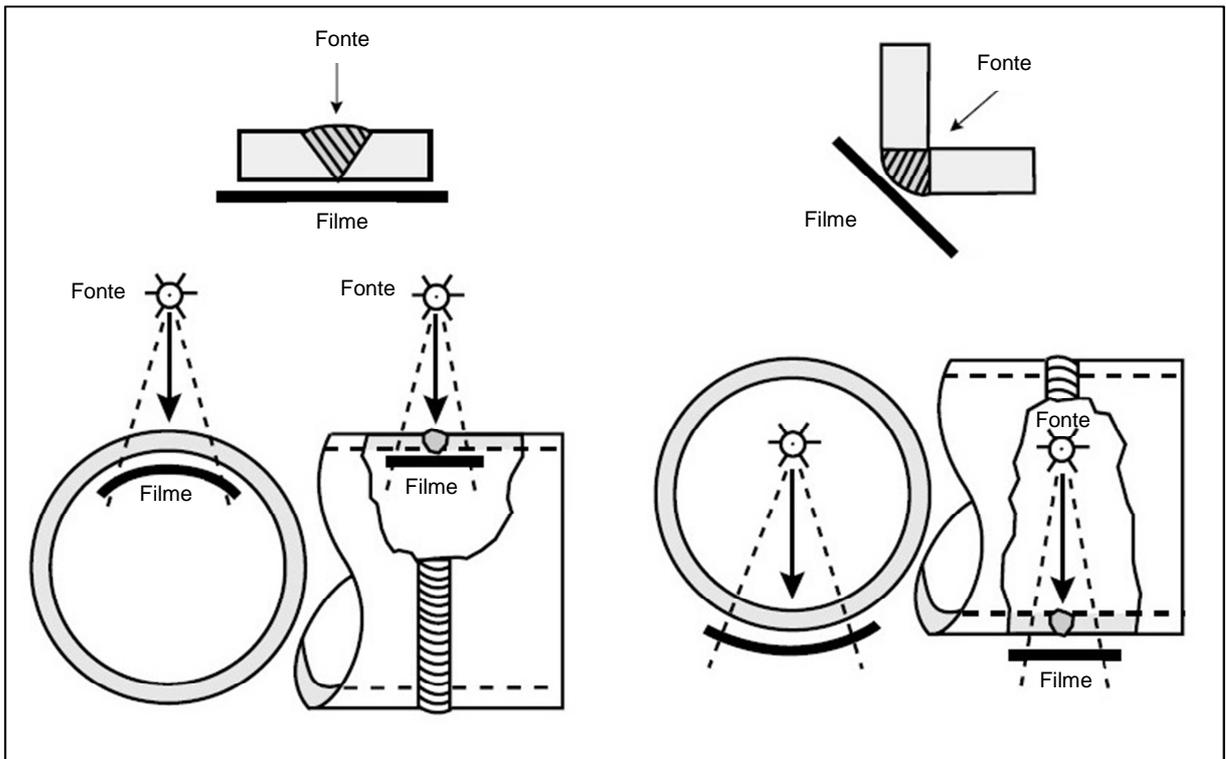


Figura 2 – Exemplos de técnicas de inspeção de soldas
Fonte: HELLIER (2003)

De acordo com ANDREUCCI (2014, 2016), as inspeções por gamagrafia são realizadas através da utilização de irradiadores, como apresentado na Figura 3. Tratam-se de equipamentos que permitem expor com segurança uma fonte radioativa. Esta fonte é armazenada dentro de uma blindagem interna, a qual propicia um nível aceitável de proteção ao operador. Os irradiadores possuem mecanismos de acionamento manual para a exposição da fonte, e permitem ao operador trabalhar a uma distância segura da fonte, evitando a exposição direta ao feixe de radiação. Conforme IAEA (1992), estes equipamentos devem respeitar requisitos de normas de segurança internacionais quanto à proteção radiológica, como suportar choques, incêndios e inundações sem que sua estrutura ou blindagem sofram danos significativos, impedindo uma intensidade de radiação ao externo fora dos padrões estabelecidos.

Ainda segundo ANDREUCCI (2014), os irradiadores são compostos por uma blindagem, uma fonte radioativa e dispositivos para a exposição da fonte. As blindagens são construídas geralmente em urânio exaurido, que devido ao seu alto número atômico, proporciona eficiência em um volume reduzido. O equipamento é contido em um recipiente externo de aço, selado, e que protege a blindagem contra choques mecânicos. Os dispositivos para exposição são geralmente constituídos de um tubo guia flexível, um cabo teleflex e um mecanismo de acionamento da fonte, podendo contar com indicador de posição da fonte radioativa. Também, pode ser utilizado um colimador, cuja função é concentrar o feixe de radiação na direção do objeto a ser inspecionado.

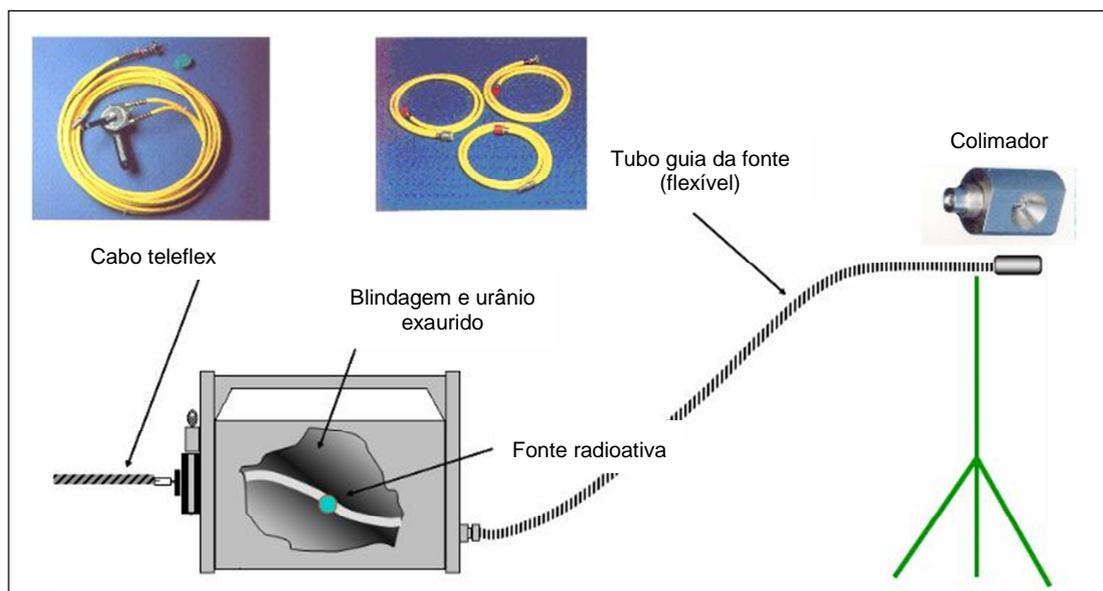


Figura 3 – Esquema de funcionamento do irradiador para gamagrafia
Fonte: ANDREUCCI (2014)

2.2.1 Fontes Radioativas Utilizadas em Gamagrafia

Os raios gama são liberados por átomos que possuem equilíbrio energético instável. Na natureza, existem poucos elementos em quantidade concentrada que possam ser utilizados como fontes industriais de raios gama (BITELLI, 2006). Com o desenvolvimento de reatores nucleares, foi possível a produção artificial de isótopos radioativos em escala industrial, através de reações nucleares de ativação. Este fenômeno acontece quando determinados elementos naturais são expostos à radiação no núcleo de um reator, sendo irradiados por nêutrons, que atingem o núcleo do átomo. Isto muda o número de massa atômica, criando um desequilíbrio energético (estado excitado de energia). O restabelecimento energético se dá através da liberação de energia na forma de raios gama ou outras partículas. Os átomos excitados emitem radiação ao longo do tempo, com uma diminuição gradativa da emissão, efeito esse chamado de decaimento radioativo.

Na gamagrafia, são utilizadas fontes de radiação de isótopos artificiais, conforme BITELLI (2006) e ANDREUCCI (2014). Tais fontes são seladas, de modo que não aconteça a dispersão de material radioativo para o exterior. Geralmente é utilizado aço inoxidável austenítico para o encapsulamento. A cápsula é solidamente fixada em uma ponta de um cabo flexível, e na outra ponta existe um engate, que

permite o uso e manipulação da fonte. Estes componentes podem ser visualizados na Figura 4.

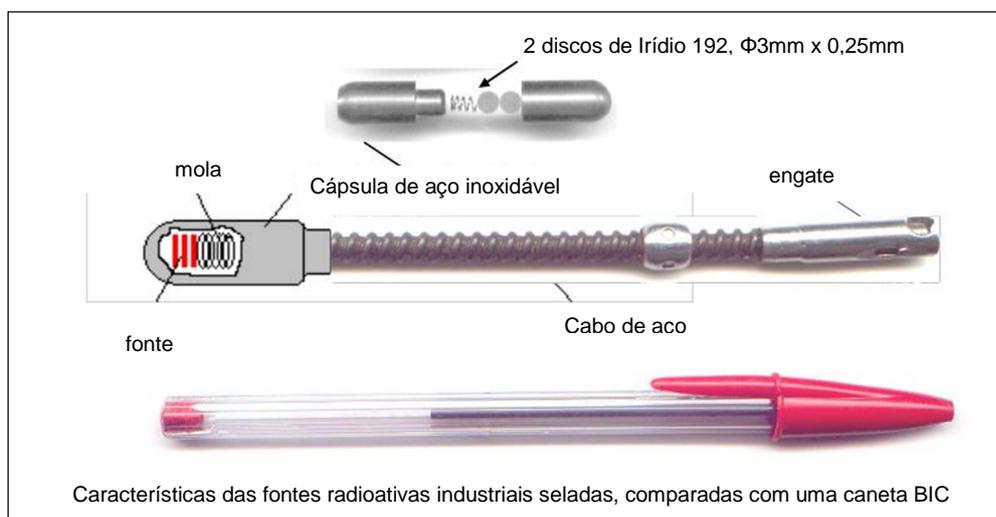


Figura 4 – Fonte radioativa selada e componentes de interface
Fonte: ANDREUCCI (2014)

Embora existam muitos elementos que podem emitir radiações gama, são poucos aqueles utilizados industrialmente, devido as suas características e propriedades físico-químicas. Conforme ANDREUCCI (2014, 2016), os principais são:

- Cobalto 60 (^{60}Co , Z-27)
- Irídio 192 (^{192}Ir , Z-77)
- Césio 137 (^{137}Cs , Z-55)
- Selênio 75 (^{75}Se , Z-34)

Ainda segundo ANDREUCCI (2016), o ^{60}Co e o ^{192}Ir são os mais utilizados. As fontes de ^{137}Cs estão em desuso atualmente, pois ao contrário das outras duas, o material radioativo encontra-se em forma de pó, o que aumenta o risco de contaminação em caso de acidentes. Além disso, é de difícil obtenção e produz imagens radiográficas de baixa qualidade.

Os irradiadores podem ser classificados conforme definições da IAEA (2005):

- Categoria I: irradiador direcional, no qual a fonte não é removida da blindagem durante a exposição. A irradiação é realizada abrindo-se um obturador ou deslocando-se a fonte dentro do próprio irradiador.

- Categoria II: irradiador panorâmico, no qual a fonte é removida da sua blindagem, por meio de um tubo guia até a posição de irradiação.

Quanto às características físicas de transporte, podem ser classificados em:

- Classe P: equipamento portátil com peso máximo de 50kg;
- Classe M: equipamento móvel, mas não portátil. Pode ser deslocado através de um dispositivo próprio.
- Classe F: equipamento fixo ou com mobilidade restrita dentro de uma área controlada.

Para atividades de gamagrafia industrial, os irradiadores mais utilizados são os que operam com ^{192}Ir , com atividade da fonte máxima de 120 Ci, porém sendo o ideal se situar entre 20 a 60 Ci (0,74 e 2,20 TBq), segundo ANDREUCCI (2014 e 2016).

2.2.2 Características do irídio 192

Conforme dados da IUPAC (2004) e LANL (2016), o irídio é um elemento químico pertencente ao grupo de metais de transição, e encontra-se no sexto período da tabela periódica. O irídio é encontrado na natureza geralmente em combinação com platina, ósmio, ouro e minério de ferro. Quando separado, o irídio metálico possui coloração prateada e brilhante, com alta dureza e baixa ductilidade, conforme. O isótopo ^{192}Ir é obtido em um reator nuclear, por bombardeamento por nêutrons do isótopo estável ^{191}Ir , através da reação de ativação (n, γ):



De acordo com LANL (2016), este isótopo possui meia vida de 74 dias, com decaimento radioativo para o isótopo estável ^{192}Pt , por emissão de raios β (beta) com níveis energéticos na faixa de 530 e 670 keV e fótons γ (gama) com níveis energéticos de 0,137 e 0,65 MeV. O fator gama (Γ) é de 3,48 $\mu\text{C}/\text{kg.h}/\text{GBq}$ a 1 m ou 0,50 R/h.Ci a 1 m ou 0,13 mSv/h.GBq a 1m.

2.3 CONCEITOS DE RADIOATIVIDADE

A radiação nuclear é a denominação dada às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo do átomo durante o processo de reestruturação interna, quando passa de instável para estável, conforme definição de TAUHATA (2014). Uma vez que as forças que atuam dentro do núcleo atômico são relevantes, as radiações nucleares são altamente energéticas.

Ainda segundo definições de TAUHATA (2014) e BITELLI (2006), as radiações nucleares são indicadores do resultado das transformações do núcleo instável, no processo de transição para estados de maior estabilidade. Ou seja, não são produtos da desintegração nuclear, que transmite a ideia de núcleos se quebrando ou desmanchando.

Logo após a descoberta do raio-X por Wilhelm Röntgen, em 1895, o físico francês Henri Becquerel trabalhou na pesquisa de uma série de substâncias emissoras desta radiação (BECQUEREL, 1896). Becquerel verificou que sais de rádio emitiam radiações capazes de impressionar chapas fotográficas, mesmo quando estas eram envoltas em papel preto e protegidas de qualquer tipo de luminosidade. A quantidade de radiação emitida era proporcional à concentração de rádio e independente das condições de pressão, temperatura ou estado químico da amostra, além de permanecer inalterada sob a ação de campos elétricos e magnéticos.

Poucos anos depois, o casal Pierre e Marie Curie (CURIE, 1898) usou pela primeira vez o termo “radioatividade” para descrever a energia emitida pelo elemento que haviam descoberto (rádio) e logo em seguida o polônio. A natureza dessas radiações emitidas pelos corpos começou a ser esclarecida em 1899, comprovando-se que não se tratava de raios-X, e sim a radiações corpusculares e radiações eletromagnéticas.

Ernest Rutherford e Frederick Soddy, no início do século XX, formularam a teoria do modelo atômico que explicou estas transformações radioativas (RUTHERFORD, 1902). Através de experimentação, os cientistas notaram que sob a ação de um campo elétrico, o feixe de radiação se dividia em três, que foram denominados radiação alfa (carga positiva), radiação beta (carga positiva ou negativa) e radiação gama (mostrado na Figura 5). Também foram diferenciadas em função do grau de penetração na matéria (ANDREUCCI, 2014).

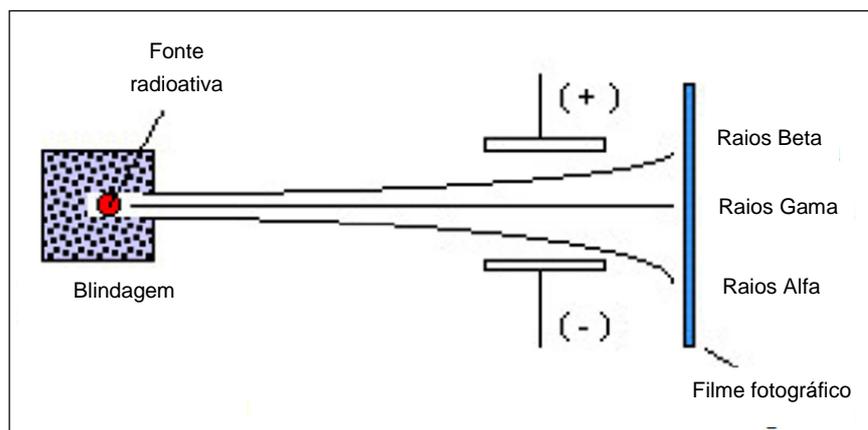


Figura 5 – Esquema de separação das radiações alfa, beta e gama
Fonte: ANDREUCCI (2014)

2.3.1 Decaimento Gama (γ)

Quando acontece um decaimento por emissão de radiação α ou β , geralmente o núcleo remanescente tem suas partículas fora da configuração de equilíbrio, ou seja, está em um estado excitado. Para retornar ao estado de equilíbrio, emite a energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética, conforme mostrado na Figura 6 (TAUHATA, 2014).

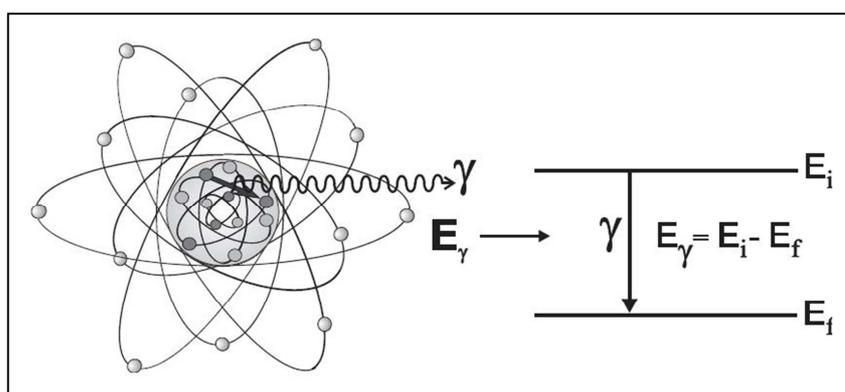


Figura 6 – Representação da emissão da radiação γ pelo núcleo
Fonte: TAUHATA (2014)

Em serviços industriais, as fontes radioativas são selecionadas em função da energia da radiação gama, da sua atividade, do tempo de meia-vida, entre outros fatores de ordem prática, relacionados à qualidade da imagem que se pretende obter. Em geral, são utilizadas fontes de Iridio 192, Cobalto 60, Selênio 75 (ANDREUCCI, 2014 e 2016).

2.4 RADIOPROTEÇÃO

Os três fatores principais a serem considerados em termos de radioproteção são tempo de exposição, distância da fonte radioativa e blindagem (ANDREUCCI, 2014 e 2016; TAUHATA, 2014; BITELLI, 2006). A fim de assegurar a proteção dos trabalhadores e do público em geral, procura-se aumentar a distância e a eficiência da blindagem em locais onde se desenvolvem atividades com utilização de fontes radioativas.

2.4.1 Tempo de Exposição

Conforme TAUHATA (2014), a dose equivalente acumulada por uma pessoa é diretamente relacionada ao tempo de exposição em que ela permanece na área. A dose pode ser então controlada pelo tempo, como expresso na Equação 2:

$$Dose = taxa\ de\ exposição \cdot tempo \quad (Eq. 2)$$

Deve-se sempre procurar diminuir o tempo de exposição do trabalhador em locais onde existem materiais radioativos ou fontes radioativas através de treinamento, procedimentos estandardizados e desenvolvimento de uma cultura de segurança da instalação radioativa e que permeie em atitudes seguras por parte do operador (TAUHATA, 2014).

2.4.2 Distância

É o meio mais prático, econômico e seguro para a redução da exposição às radiações ionizantes, segundo TAUHATA (2014). Em situações de emergência, também é o meio mais rápido a ser implementado.

A intensidade da radiação emitida por uma fonte de raios-X ou gama diminui a medida que aumenta a distância da mesma. Esta característica é mostrada através da Lei do Inverso do Quadrado da Distância (ANDREUCCI, 2016). Pequenos afastamentos da fonte causam uma grande redução da intensidade de

radiação. Considerando uma fonte radioativa puntiforme, pode-se escrever a relação entre distância e intensidade como expresso na Equação 3:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde “ I_1 ” é a intensidade da radiação a uma distância “ d_1 ”; “ I_2 ” é a intensidade da radiação a uma distância “ d_2 ”.

2.4.3 Blindagem

Conforme a bibliografia consultada (IAEA, 1992; ANDREUCCI, 2016; ICRP, 1991; TAUHATA, 2014; BITELLI, 2006), o uso de blindagem também é outra forma de proteção contra radiações ionizantes. É um método eficaz que possibilita o trabalho com fontes radioativas de alta intensidade. Utiliza-se a blindagem quando o fator distância não é o suficiente para proteção contra as radiações. Como desvantagens, pode-se citar o custo mais elevado, necessidade de obras civis e aprovação dos projetos e da operação por parte dos órgãos competentes. A blindagem constitui-se de barreiras físicas, que podem ser realizadas com diversos tipos de materiais, de acordo com a radiação a ser contida. Alguns dos materiais mais utilizados são o concreto, concreto baritado, plásticos (PVC, Polietileno, acrílico), chumbo, aço, água, etc. Baseia-se no princípio da atenuação, o qual é a capacidade de um material de reduzir o efeito da onda ou fóton através da interação ou espalhamento. Partículas carregadas podem ser atenuadas através da perda de energia em reações com elétrons na blindagem, enquanto raios-X e raios gama podem ser atenuados através de fenômenos como o efeito fotoelétrico, emissão, espalhamento de Compton ou, em altas energias, como a produção de pares.

Ainda, segundo indicações da IAEA (1992) citadas por TAUHATA (2014), o cálculo e projeto da blindagem de uma instalação devem considerar a localização da fonte de radiação, as direções possíveis de incidência do feixe, o tempo de utilização da máquina ou fonte, os locais e áreas vizinhas e a planta da instalação. Deve-se calcular a barreira primária e também a barreira secundária, uma vez que existe

espalhamento da radiação nas paredes, no próprio equipamento e na atmosfera circunstante. Uma vez escolhidos os materiais para as blindagens, procede-se com o cálculo de espessuras e projeto de geometrias que otimizem a redução do nível de radiação para valores dentro dos limites de normas de proteção radiológica.

2.4.3.1 Cálculo de blindagem para raios gama

Para determinada intensidade de radiação que incida um material, a sua redução é dada pela natureza do material absorvedor e sua espessura (TAUHATA, 2014). Pode-se utilizar a lei da atenuação exponencial para primeira aproximação, como apresentado pela Equação 4:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde “ I ” é a intensidade atenuada do feixe; “ I_0 ” é a intensidade inicial do feixe; “ μ ” é o coeficiente de atenuação total do material para uma energia “ E ”; “ $\frac{\mu}{\rho}$ ” é o coeficiente de atenuação total em massa; “ ρ ” é a densidade do material e “ x ” a espessura da blindagem.

Conforme TAUHATA (2014), quando um material é constituído de uma mistura ou composição de diversos elementos químicos, é possível calcular o coeficiente de atenuação linear pela média ponderada, conforme a Equação 5:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum \left(\frac{\mu_i}{\rho_i} \right) \cdot \omega_i \quad (\text{Eq. 5})$$

onde “ ω_i ” é a participação percentual do elemento químico no composto.

Ainda, segundo TAUHATA (2014), analisando as expressões anteriores, pode-se concluir que o que determina o grau de atenuação é o produto “ $\rho \cdot x$ ” (g/cm^2), dado que “ $\frac{\mu}{\rho}$ ” é quase constante para diversos materiais. Em termos práticos, isso significa que materiais de alta densidade são mais eficientes como blindagem para reduzir a intensidade de radiação que materiais de baixa densidade. Todavia,

materiais de baixa densidade podem compensar esta desvantagem com o aumento da espessura.

Conforme TAUHATA (2014) e ANDREUCCI (2016), para blindagens de raios gama, o chumbo é um material bastante utilizado devido à sua densidade e ao alto número atômico.

2.4.3.2 Camada semi-redutora (HLV)

O coeficiente de atenuação total “ μ ” depende do material atenuador e da energia do feixe incidente. Para fontes que emitem fótons com várias energias, deve-se usar diferentes valores de “ μ ”, para cada energia do feixe e para as diversas taxas de emissão de cada radiação (TAUHATA, 2014).

Também, segundo TAUHATA (2014), uma vez que a intensidade de um feixe de fótons não pode ser atenuada totalmente em uma barreira, utiliza-se um parâmetro experimental, conhecido como “*HLV*” (*Half Value Layer*), o qual representa a espessura do material que atenua metade da intensidade do feixe de fótons. Pode-se escrever a relação entre “ μ ” e “*HLV*” como na Equação 6:

$$\mu = \frac{\ln(2)}{HLV} = \frac{0,693}{HLV} \rightarrow HLV = \frac{0,693}{\mu} \quad (\text{Eq. 6})$$

De acordo com TAUHATA (2014), substituindo na Equação 6, pode-se escrever a intensidade como a Equação 7:

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{0,693}{HLV} \cdot x} \quad (\text{Eq. 7})$$

Considerando a redução de metade da intensidade de radiação, o valor de “*HLV*” será o mesmo da espessura “ x ” (TAUHATA, 2014). Tem-se a Equação 8:

$$I = \frac{I_0}{2^n} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde “ n ” é o número de camadas semi-redutoras, conforme a Equação 9:

$$n = \frac{x}{HLV} \quad (\text{Eq. 9})$$

2.4.3.3 Camada deci-redutora (TLV)

De acordo com TAUHATA (2014), tal como para a camada semi-redutora, outro parâmetro utilizado para cálculo de blindagens é a camada deci-redutora “TLV” (*Tenth Value Layer*), que representa a espessura à qual atenua a intensidade do feixe de fótons em um fator de 10, conforme a Equação 10.

$$\mu = \frac{\ln(10)}{TLV} = \frac{0,230}{TLV} \rightarrow TLV = \frac{0,230}{\mu} \quad (\text{Eq. 10})$$

Assim, TAUHATA (2014) mostra que, utilizando-se das Equações 7, 8 e 9, tem-se a Equação 11:

$$m = \frac{x}{TLV} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde “*m*” é o número de camadas deci-redutoras.

2.4.3.4 Fator de redução ou atenuação

Segundo ANDREUCCI (2016), outro parâmetro muito utilizado no cálculo de blindagens é o fator de redução “FR” ou fator de atenuação “FA”. Considerando “*n*” o número de camadas semi-redutoras (HLV) e “*m*” o número de camadas deci-redutoras (TLV) que formam a espessura de uma barreira, pode-se estabelecer a relação entre “*m*”, “*n*” e “*I*”, como mostrado pela Equação 12:

$$FR = \frac{I_0}{I} \rightarrow FR = 10^m = 2^n \quad (\text{Eq. 12})$$

2.4.3.5 Fator de “*build up*” (ou fator de crescimento)

Em feixes colimados, considerando-se atenuação exponencial da radiação eletromagnética, os fótons espalhados pelas interações com a matéria são completamente removidos do feixe transmitido, na direção da incidência (TAUHATA, 2014). Quando se trata de uma fonte normal, sem feixe colimado, boa parte dos fótons espalhados reincide na direção do detector e contribui para o feixe transmitido, modificando o comportamento de atenuação exponencial do feixe.

Segundo TAUHATA (2014), essa diferença aumenta a intensidade do feixe em relação ao valor inicial. É possível corrigir esta diferença com um fator denominado fator de “*build up*” (ou fator de crescimento), o qual depende da energia da radiação, do material de blindagem e espessura, e cuja atenuação pode ser representada pela Equação 13:

$$I = I_0 e^{-\frac{0,693 \cdot x}{HLV}} \cdot B(\mu x) \quad (\text{Eq. 13})$$

onde “ $B(\mu x)$ ” pode ser estimado através de expressões semi-empíricas como na Equação 14 (TAUHATA, 2014):

$$B(\mu x) = 1 + a \cdot \mu \cdot x \cdot e^{b \cdot \mu \cdot x} \quad (\text{Eq. 14})$$

cujos parâmetros “ a ” e “ b ” são obtidos em gráficos ou tabelas, em função da energia de radiação e do tipo de material. Os gráficos apresentados nas Figuras 7 e 8 apresentam as curvas “ a ” e “ b ” para os elementos mais utilizados em blindagens.

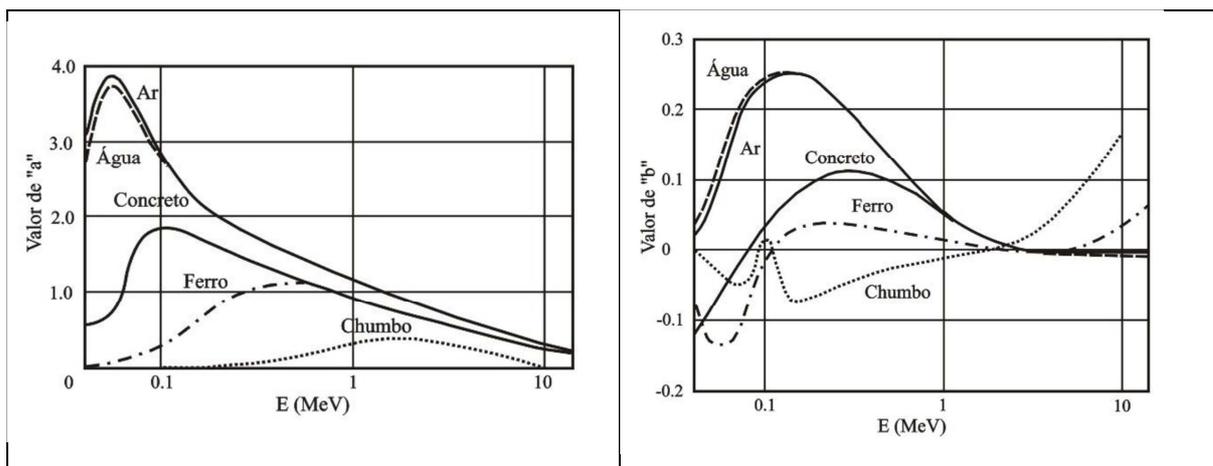


Figura 7 – Gráfico do valor de “a” em função da energia da radiação (esquerda)

Figura 8 – Gráfico do valor de “b” em função da energia da radiação (direita)

Fonte: TAUHATA (2014)

2.5 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS E DOSIMETRIA

Nesta secção, são apresentadas algumas referências a unidades e grandezas que medem características de radiações ionizantes e de substâncias radioativas. Também, são apresentados os conceitos relativos à dosimetria e valores de referência conforme legislação vigente.

2.5.1 Atividade

Conforme TAUHATA (2014), a atividade “A” de uma amostra radioativa é a razão da variação do número de desintegrações nucleares “dN” num determinado intervalo de tempo “dt”. Pode ser representada pela Equação 15:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (\text{Eq. 15})$$

A unidade de atividade convencional é o Becquerel (Bq). Uma desintegração por segundo corresponde a 1 Bq. Até 1977, a unidade padrão de atividade era o Curie (Ci), que corresponde a atividade de 1g de rádio, conforme ICRP (1977). Esta quantidade de rádio possui uma atividade $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} / \text{s}$. A correspondência é mostrada na Equação 16:

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq \quad (\text{Eq. 16})$$

2.5.2 Exposição

De acordo com ANDREUCCI (2016), a exposição é uma medida da quantidade de radiação absorvida pelo ar, definida a partir da ionização que os fótons (raios X ou γ) produzem no ar, e se relaciona diretamente com o fluxo de radiação incidente num corpo. Assim, a exposição é a razão entre a carga elétrica gerada pela ionização e a massa do volume de material onde ela se distribuiu, conforme a Equação 17:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (\text{Eq. 17})$$

onde “ Q ” é a carga (em Coulomb) e “ m ” a massa.

2.5.3 Dose Efetiva

Segundo ANDREUCCI (2016), a dose efetiva “ E ” é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos, mostrada na Equação 18:

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad (\text{Eq. 18})$$

onde “ H_T ” é a dose equivalente no tecido ou órgão e “ w_T ” o fator de ponderação deste órgão ou tecido. A unidade no sistema internacional é o Joule por quilograma (J/kg), denominada Siviert (Sv).

Os valores de “ w_T ” estão associados a sensibilidade do órgão e seus valores podem ser encontrados em tabelas fornecidas pelo ICRP (1991).

2.5.4 Relação entre Taxa de Exposição e Atividade

De acordo com ANDREUCCI (2016) e TAUHATA (2014), a taxa de exposição pode ser relacionada à atividade de uma fonte radioativa de raios gama se satisfizer as seguintes condições:

- A fonte é de pequenas dimensões, de modo que o fluxo varie com o inverso do quadrado da distância;
- A atenuação através do ar entre a fonte e o ponto de medição seja desprezível ou corrigida pelo fator de atenuação;
- Somente fótons provenientes da fonte contribuem para o ponto de medição (não há espalhamento nos materiais adjacentes);

Conforme TAUHATA (2014), a taxa de exposição pode ser expressa como a Equação 19:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} \quad (\text{Eq. 19})$$

onde “ Γ ” é a constante de taxa de exposição para um dado isótopo, conhecido como “gamão”, e expresso como (R.m²) / (Ci.h); “A” é a atividade da fonte gama, expressa em (Ci); e “d” a distância entre a fonte e o ponto de medição. Os valores de “ Γ ” são tabelados (TAUHATA, 2014). Portanto, entende-se que “ Γ ” representa a taxa de exposição em R/h para uma fonte de 1 Ci e a 1 metro de distância.

2.5.5 Relação entre Exposição e Dose Equivalente

Segundo TAUHATA (2014), considerando-se o fator de ponderação da radiação “w_R” para a radiação gama é 1, conclui-se a Equação 20:

$$H = D = X \quad (\text{Eq. 20})$$

Ainda, de acordo com TAUHATA (2014), levando em consideração o tempo de ocupação para cálculo da dose equivalente, tem-se a Equação 21:

$$H = \dot{X} \cdot t \quad (\text{Eq. 21})$$

Conforme TAUHATA (2014), substituindo-se na Equação 19, tem-se a Equação 22:

$$H = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} \cdot t \quad (\text{Eq. 22})$$

onde “*H*” é a dose equivalente (rem); e “*t*” o tempo de exposição (em horas).

2.5.6 Legislação e Dosimetria

No Brasil, a legislação pertinente a insalubridade e periculosidade decorrente da exposição a radiações ionizantes é tratada, respectivamente, pelo Anexo 5 da NR-15 (BRASIL, 2015a) e pela Portaria 3.393/1987 (BRASIL, 1987) do Ministério do Trabalho, que estendeu o disposto no Art. 193 da CLT sobre periculosidade às atividades executadas com radiações ionizantes.

O Anexo 5 da NR-15 (BRASIL, 2015a) remete para a Norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a) para a definição dos princípios, determinações das obrigações e dos tipos de controles básicos para a proteção do homem e do ambiente, e também a definição dos limites de tolerância a serem aplicados.

A norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a) utiliza critérios próprios no que se refere aos valores permissíveis das doses de radiação, que são denominados limites primários anuais de dose equivalente. Dentre estes limites primários, o mais usual é a dose equivalente efetiva. Essa dose é medida em Siviert (Sv) ou em rem (Roentgen equivalente man). O valor de 1Sv equivale a 100 rem.

Ainda, a norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a) considera dois grandes grupos de indivíduos:

- *Indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE): são aqueles que trabalham e operam em ambiente com radiações ionizantes. Estes devem ser monitorados quanto aos valores de radiação recebidos;*

- *Indivíduos do público: pessoas que não trabalham ou operam em ambientes com radiações ionizantes, mas podem estar sujeitos a elas.*

Os limites de dose foram alterados pela Portaria 453/1998 (BRASIL, 1998) do Ministério da Saúde, para valores mais restritos, que são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de doses anuais (a)

Grandeza	Órgão	IOE	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20mSv (b)	1mSv (c)
	Cristalino	150mSv	15mSv
Dose equivalente	Pele (d)	500mSv	50mSv
	Mãos e pés	500mSv

Fonte: Portaria 453/1998 (BRASIL, 1998)

(a) Para fins de controles administrativos da CNEN, o termo dose Anual deve ser considerada como dose no ano calendário, isto é, no período de Janeiro a dezembro de cada ano;

(b) Média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv (5000 mRem) em qualquer ano.

(c) Em circunstância especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5m Sv (500 mRem) em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano;

(d) Valor médio em 1cm² de área, na região mais irradiada.

Quanto às instalações para atividades de radiologia industrial, estas devem respeitar a norma CNEN NN 6.02 (CNEN, 2014b). Esta norma estabelece os requisitos necessários ao licenciamento do local, aos aspectos de segurança, construção e operação, bem como os controles de aquisição e movimentação de fontes radioativas.

Ainda, segundo a norma CNEN NN 6.02 (CNEN, 2014b), para aplicações dos critérios de proteção, as instalações são divididas em instalações que utilizam fontes seladas, aquelas com fontes não seladas, instalações que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante e para a produção de radioisótopos.

Quanto ao serviço de radiografia industrial, este é regido pela Norma CNEN 6.04 (CNEN, 2013), que estabelece os requisitos necessários para a operação de serviços de radiografia industrial, e procedimentos para aquisição de fontes radioativas ou equipamentos de raios X utilizados em radiografia.

2.5.7 Classificação das Áreas

A norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a) estabelece um sistema de classificação de áreas para auxiliar o controle das exposições ocupacionais. Os locais de trabalho são divididos em dois tipos: áreas controladas, áreas supervisionadas e áreas livres.

Conforme a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), tais áreas devem ser classificadas sempre que houver previsão de exposição radiológica, e devem ser definidas no Plano de Proteção Radiológica (PPR). Também, sempre que necessário deve-se revisar esta classificação, quando houver mudanças no modo de operação ou modificações que possam alterar as condições de exposição.

2.5.7.1 Áreas controladas

De acordo com a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), as áreas controladas são qualquer tipo de área na qual se devem tomar medidas específicas de proteção radiológica para controlar as exposições de rotina e evitar a contaminação durante condições normais de operação e/ou evitar ou limitar a extensão das exposições potenciais.

Conforme a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), na limitação destas áreas, devem ser considerados a magnitude das exposições normais previstas, a magnitude das exposições potenciais e tipo e extensão dos requisitos de proteção e segurança necessárias. Os valores de taxa de dose são uma fração do limite de dose, considerando-se as devidas medidas de segurança e proteção necessárias. Tais áreas devem respeitar diversos critérios, como serem sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, contar com medidas de proteção

previstas no PPR, ter acesso restrito, contar com equipamento de proteção, bem como instrumentação de monitoração e descontaminação pertinentes.

2.5.7.2 Áreas supervisionadas

Segundo a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), as áreas supervisionadas são áreas sob vigilância onde as condições de exposição ocupacional necessitem ser mantidas sob supervisão, mas não são classificadas como controladas.

Ainda, a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a) estabelece que tais áreas devem ser delimitadas e possuir sinalização nos pontos de acesso. As condições de exposição devem ser periodicamente revistas para determinar a necessidade de adoção de medidas de proteção e segurança ou mudanças nas delimitações destas áreas.

2.5.7.3 Áreas livres

De acordo com a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), as áreas livres são aquelas que não são classificadas como controladas ou supervisionadas. A dose para os indivíduos nas áreas livres não deve exceder o limite previsto para indivíduos do público, de 1mSv/ano ou fração proporcional ao tempo de permanência na área.

Conforme a CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a), estas áreas devem possuir um programa de monitoração adequando, de modo a garantir sua classificação como área livre. Este programa deve abranger todas as possíveis formas de exposição.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento de um projeto de blindagem, devem-se considerar os parâmetros tempo, distância e tipo de blindagem. Devem ser seguidos três passos:

- Estabelecer uma dose de radiação a ser obtido para a área ocupada;
- Estimar o valor da dose de radiação na área ocupada, desconsiderando a existência da blindagem;
- Obter o fator de atenuação necessário para reduzir o valor da dose no passo anterior para o valor da dose de radiação no primeiro passo.

Neste trabalho, foram calculadas as barreiras de proteção (blindagem) para redução da distância de isolamento, de áreas destinadas à atividade de radiografia industrial (gamagrafia). Este tipo de área é necessária quando da construção de uma nova planta que necessite destes serviços, tais como fábricas de papel, instalações petrolíferas e centrais de geração de energia, para inspeção de tubulações, soldas, vasos de pressão, etc. A área de inspeção, devido às suas barreiras, é também chamada de *bunker* de radiografia industrial, e pode ser utilizada também em reformas e obras de manutenção destas plantas.

Foram realizados os cálculos de proteção radiológica pertinentes, e outras considerações conforme as normas CNEN NN 3.02 (CNEN, 2014a), CNEN NE 6.02 (CNEN, 1988) e CNEN NE 6.04 (CNEN, 2013). O cálculo estrutural de fundações, vigas e colunas de sustentação das paredes e piso não faz parte do escopo deste trabalho.

3.1 FONTE RADIOATIVA

Foi considerada a utilização de uma fonte radioativa convencional de Iridio 192, montada em um irradiador de gamagrafia. A atividade máxima desta fonte é de 60 Ci (2220 GBq) e sua classificação, conforme indicações da IAEA (2005), é Categoria II e Classe P.

Considerou-se a utilização da fonte juntamente com um colimador direcional do feixe de radiação, construído em tungstênio, com um fator de redução $FR = 32$.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO *BUNKER*

O *bunker* em questão foi calculado para utilização em fins práticos de atividades de gamagrafia, com inspeções de soldas de tubulações e outros equipamentos aplicável em qualquer planta onde se deva exercer a atividade de gamagrafia industrial. Constitui-se numa instalação não definitiva, com vida útil com segurança de cerca de 4 anos.

Em um dos lados do *bunker*, foi ser prevista uma parede que permita carga e descarga de material a ser radiografado. O material é transportado até esse local através de caminhões com guindaste, que faz também o manuseio do material para dentro e para fora. Especificamente neste lado, para o *bunker* semi-enterrado, foi considerado o cálculo tradicional de blindagem, da espessura mínima utilizando a correção pelo fator de “*build up*”. Nos demais lados, a blindagem foi calculada levando-se em consideração as taxas de dose na parte inferior à rampa, comparando o valor de dose com os limites do indivíduo do público. No caso dos *bunkers* de superfície, a atenuação das radiações em todos os lados foi calculada considerando-se o efeito de *build up*.

As operações de carregamento e descarregamento do material a ser inspecionado são realizadas com a fonte na posição “recolhida” (sem exposição), e devem ser realizadas apenas com os portões fechados e trancados.

É importante observar que o operador, durante as atividades de gamagrafia, não permanece no interior do *bunker*. A exposição da fonte é teleguiada pelo lado de fora da instalação, através de um cabo teleflex que passa por um tubo em “S” na parede do *bunker*.

Não é objeto deste trabalho o cálculo estrutural das paredes, vigas e colunas, bem como o fenômeno de *skyshine* (NCRP, 1977). Também, é importante ressaltar que, durante a fase de credenciamento e autorização de funcionamento da estrutura perante o CNEN (CNEN, 2014b), os níveis reais de atenuação da radiação devem ser medidos e os valores comparados com os limites previstos em norma, seja para o IOE como também para o público em geral.

3.2.1 Áreas de Atividade

As áreas foram classificadas conforme norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a):

- A área controlada, constituída pelo interior do *bunker*;
- A área supervisionada, formada pelas partes adjacentes, entre a parte exterior do *bunker* e o muro de proteção física;
- A área livre, externa à cerca de proteção física.

Quanto ao armazenamento da fonte radioativa, foi previsto um local específico dentro do *bunker* para deixar os irradiadores, no caso de instalações com acesso através de escada. Este depósito e sua tampa são construídos em aço e dispõem de tranca por cadeado. As chaves do local de armazenamento estão sob guarda do Responsável por Instalação Aberta (RIA), no caso pelo operador II certificado pela CNEN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as análises das propostas para a construção de *bunkers* para radiografia industrial:

- *Bunker* semi-enterrado
- *Bunker* de superfície, com paredes de concreto
- *Bunker* de superfície, com paredes de aço
- *Bunker* de superfície, com parede composta de aço + água + aço

4.1 BUNKER SEMI-ENTERRADO

O *bunker* semi-enterrado é uma construção que utiliza o material retirado na própria escavação como blindagem radioativa. Este material é recolocado nas laterais, de modo que em conjunto com as paredes estruturais de concreto, permita que as doses nos pontos de interesse estejam abaixo daquelas estabelecidas por norma.

4.1.1 Layout da Área

A Figura 9 mostra uma vista de cima do *bunker*, com as indicações de áreas conforme a norma CNEN NE 3.01 (CNEN, 2014a). A área de trabalho possui dimensões de 12 x 12m, com uma profundidade total de 2,6m. Existe uma escada interna de largura 1 m, a qual possui corrimão, rodapé e fechamento de grade, conforme a NR-18 (BRASIL, 2015b). O piso interno possui uma inclinação com sistema de drenagem, para as águas pluviais. Existem também tubos em “S” de PVC nas paredes do local, de diâmetro 100mm, para a passagem do cabo teleflex do irradiador, que é acionado através do lado de fora. As operações com a fonte serão permitidas somente com o portão de ingresso fechado e sem pessoas dentro do *bunker*, sendo apenas autorizada a permanência do operador na área supervisionada.

Serão removidos cerca de 360m^3 de solo, que fornecerá aproximadamente 225m^3 de solo compactado, o qual será usado como blindagem externa em 3 lados do *bunker*. O quarto lado constitui-se de área de carga e descarga com caminhão com um sistema de talha giratória. Este lado não possui o solo compactado: assim, a espessura desta parede deverá ser calculada de forma tal a compensar a perda de atenuação da intensidade de radiação do solo.

Dentro do *bunker* existe um local para armazenamento provisório da fonte. Este local deve ser construído de paredes de concreto (externamente) e aço (internamente), e possuir uma tampa de aço com vedação, para proteger o equipamento das intempéries e umidade.

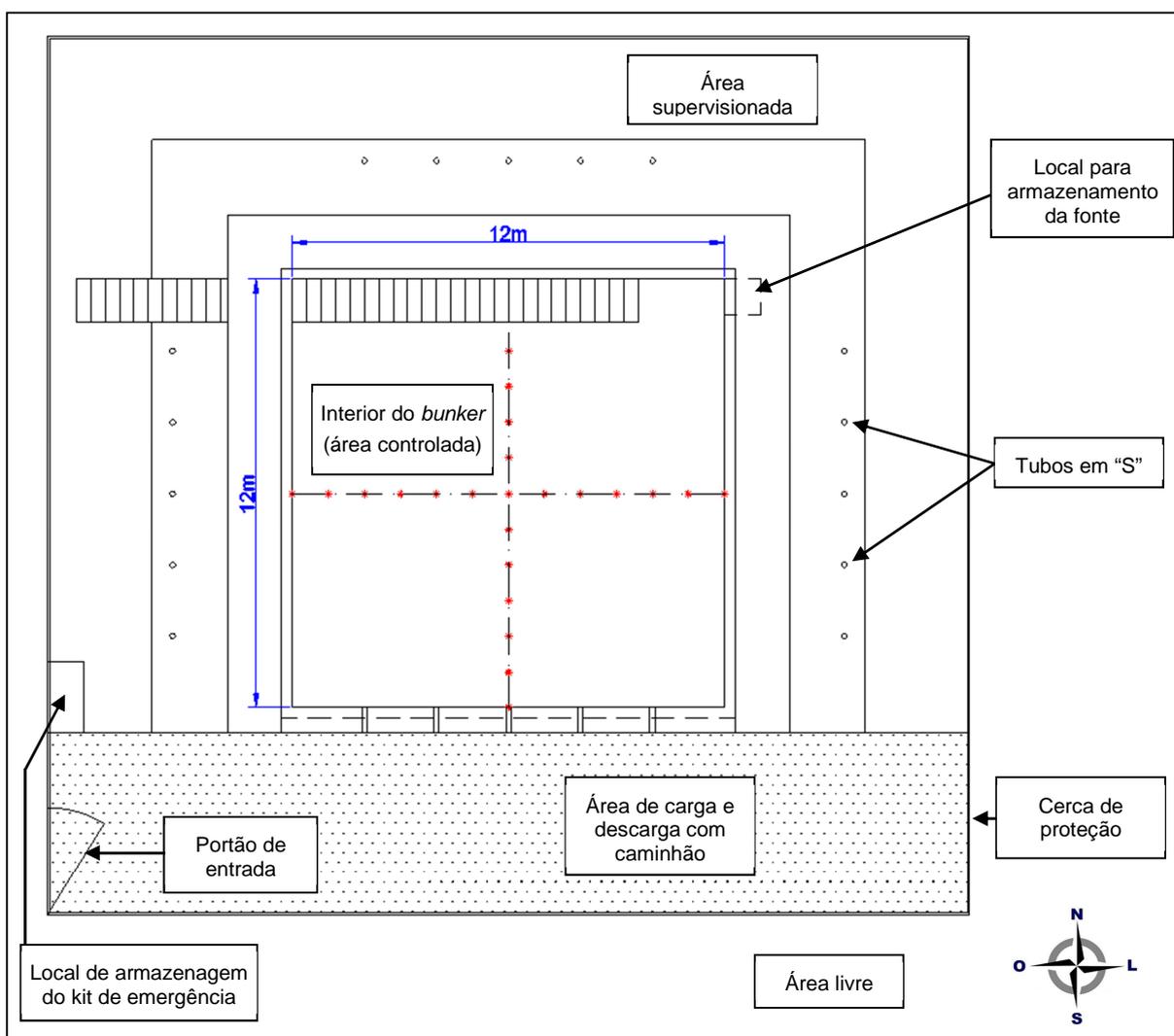


Figura 9 – Vista de cima do *bunker* semi-enterrado
Fonte: Autor (2016)

A Figura 10 mostra uma vista em secção do *bunker*. Quanto ao posicionamento da fonte, são mostrados vários pontos, que serão utilizados posteriormente para cálculo. A altura máxima entre o nível do piso e o ponto de irradiação é de 1,5m. No perímetro externo, existe uma cerca de segurança, que separa a área livre da área supervisionada.

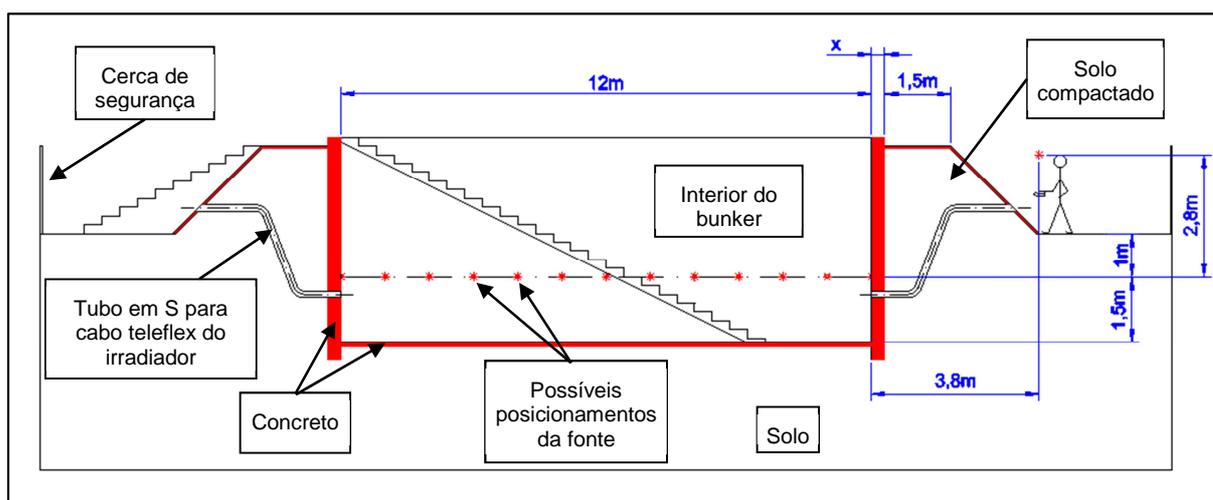


Figura 10 – Vista em corte do *bunker* semi-enterrado
Fonte: Autor (2016)

4.1.2 Cálculos de Espessura das Paredes

O solo, como material de blindagem, não dispõe de tabelas específicas para fatores de correção de “*Build-up*”. Assim, é adotado o método de cálculo por fator de redução com as seguintes considerações:

- Camadas semi-redutoras (HLV)
 - $HLV_{\text{solo}} = 6,4\text{cm}$, conforme ICRP 33 (ICRP, 1981);
 - $HLV_{\text{concreto}} = 4,1\text{cm}$, conforme ICRP 33 (ICRP, 1981);
- Fator gama para $^{192}\text{Ir} = 13\text{mSv/h.GBq}$ a 1m de distância
- Atividade da fonte: 60Ci (2200GBq)
- Taxa de exposição máxima aceitável:
 - O limite de dose para o público é de 1mSv/ano, conforme CNEN (2014a);
 - Um trabalhador empregado pode trabalhar em torno de 2000hs anuais;
 - Dividindo-se a dose pela quantidade de horas anuais, a dose máxima que o indivíduo pode estar exposto é de 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ (0,05mRem/h).

Os cálculos da blindagem requerida são realizados partindo-se de uma espessura de parede de 30cm. São calculados vários pontos de exposição da fonte, conforme Figura 11 (que representa a figura em corte do *bunker* das paredes Leste-Oeste) e Figura 112 (que representa a figura em corte do *bunker* das paredes Norte-Sul).

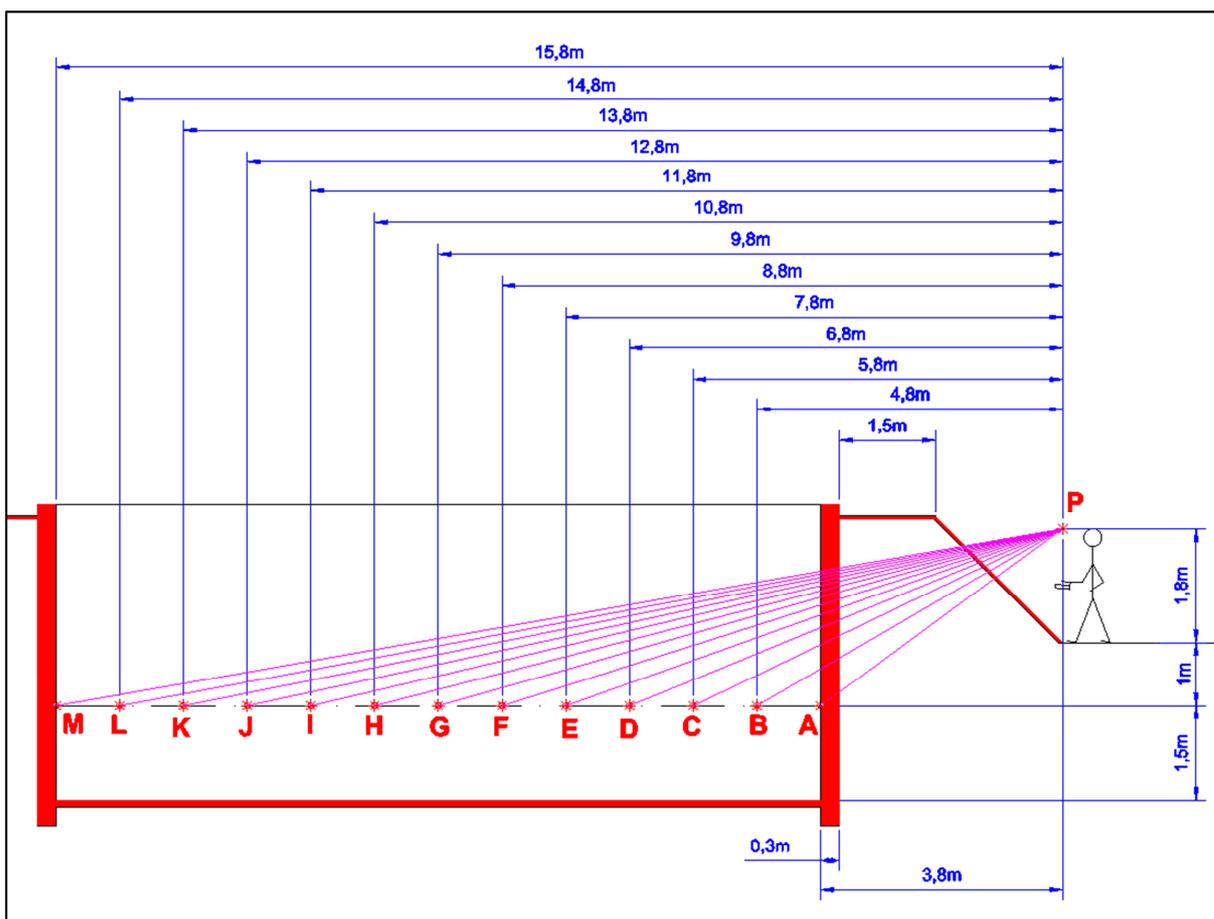


Figura 11 – Posicionamentos da fonte para cálculo de exposição (Leste-Oeste)
Fonte: Autor (2016)

4.1.2.1 Cálculo da taxa de exposição

A taxa de exposição do operador de gamagrafia é calculada através da Equação 23, a qual considera a Equação 19, com as correções devidas às camadas semi-redutoras:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2 \cdot 2^{\frac{E_c}{HLV_c}} \cdot 2^{\frac{E_s}{HLV_s}}} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde “ \dot{X} ” é a taxa de exposição, em [mSv/h]; “ Γ ” é o fator gama da fonte, em [Sv/h.GBq]; “ A ” é a atividade da fonte, em [GBq]; “ d ” é a distância entre a posição da fonte e o ponto de referência de exposição, em [m]; “ E_c ” é a espessura do concreto, em [cm]; “ HLV_c ” é a camada semi-redutora do concreto, em [cm]; “ E_s ” é a espessura do solo, em [cm]; “ HLV_s ” é a camada semi-redutora do solo, em [cm];

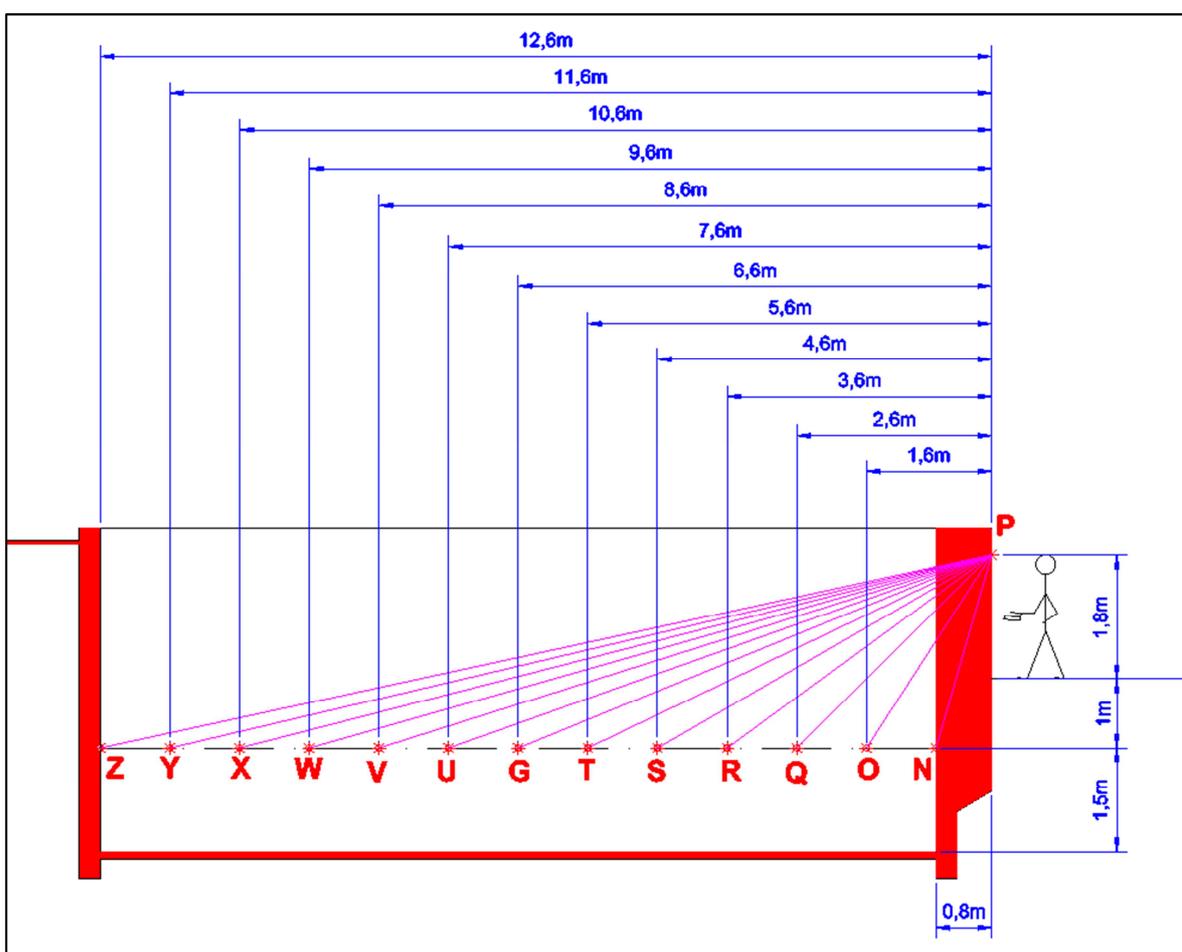


Figura 12 – Posicionamento da fonte para cálculo de exposição (Norte-Sul)
Fonte: Autor (2016)

As distâncias e os cálculos de taxa de exposição são apresentados na Tabela 2 (para as paredes Leste, Oeste e Norte) e Tabela 3 (para a parede Sul).

Todos os pontos calculados resultam em taxas de exposição menor que o limite estabelecido ($0,5\mu\text{Sv/h}$ ou $5 \times 10^{-4} \text{mSv/h}$). Com relação à taxa de exposição

com uso de colimador, pode ser calculado como a taxa de exposição encontrada sem uso de colimador, dividida por “FR”, que neste caso é de 32. Assim, os valores encontrados são ainda menores que os das Tabelas 2 e 3 e respeitam os limites estabelecidos pela legislação.

Tabela 2 – Taxa de exposição para as paredes Leste, Oeste e Norte

Posição da fonte	Espessura do concreto (cm)	Espessura do solo (cm)	Distância entre a fonte e o ponto de exposição (m)	Taxa de exposição (mSv/h)
A	37,2	306	4,72	$9,64 \cdot 10^{-17}$
B	34,7	273,6	5,557	$3,55 \cdot 10^{-15}$
C	33,3	253,8	6,44	$2,86 \cdot 10^{-14}$
D	32,4	240,6	7,354	$1,07 \cdot 10^{-13}$
E	31,9	231,1	8,287	$2,56 \cdot 10^{-13}$
F	31,5	224	9,235	$4,75 \cdot 10^{-13}$
G	31,2	218,4	10,192	$7,52 \cdot 10^{-13}$
H	31	213,9	11,157	$1,06 \cdot 10^{-12}$
I	30,8	210,2	12,128	$1,38 \cdot 10^{-12}$
J	30,7	207,1	13,103	$1,68 \cdot 10^{-12}$
K	30,6	204,4	14,081	$1,99 \cdot 10^{-12}$
L	30,5	202,2	15,063	$2,24 \cdot 10^{-12}$
M	30,5	200,2	16,04	$2,45 \cdot 10^{-12}$

Fonte: Autor (2016)

Tabela 3 – Taxa de exposição para a parede Sul

Posição da fonte	Espessura do concreto (cm)	Espessura do solo (cm)	Distância entre a fonte e o ponto de exposição (m)	Taxa de exposição (mSv/h)
N	291,2	0	2,91	$1,41 \cdot 10^{-20}$
O	132	0	3,329	$5,25 \cdot 10^{-9}$
Q	113,1	0	3,96	$9,06 \cdot 10^{-8}$
R	99,3	0	4,72	$6,57 \cdot 10^{-7}$
S	92,6	0	5,56	$1,47 \cdot 10^{-6}$
T	88,8	0	6,44	$2,08 \cdot 10^{-6}$
G	86,5	0	7,35	$2,36 \cdot 10^{-6}$
U	85	0	8,29	$2,39 \cdot 10^{-6}$
V	84	0	9,23	$2,28 \cdot 10^{-6}$
W	83,1	0	10,19	$2,18 \cdot 10^{-6}$
X	82,6	0	11,16	$1,98 \cdot 10^{-6}$
Y	82,2	0	12,13	$1,79 \cdot 10^{-6}$
Z	81,9	0	13,1	$1,62 \cdot 10^{-6}$

Fonte: Autor (2016)

Quanto à parede sul (Tabela 3), é considerada apenas a própria parede de concreto como elemento de blindagem. Assim, no caso do ponto “N”, a distância entre fonte e ponto de exposição é a diagonal de cor lilás que atravessa a parede.

4.1.3 Relação de custos

Na Tabela 4 são apresentados os principais custos para a construção do *bunker* semi-enterrado. Os valores de referência foram obtidos através das tabelas SINAPI (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2016), para o Estado do Paraná, mês de Abril de 2016, com custo desonerado.

Tabela 4 – Custos de construção do *bunker* semi-enterrado

Material	Índice Sinapi	Unid.	Quant.	Custo unit. [R\$]	Custo total [R\$]
Escavação e carga material, mecanizada	74151/001	m ³	3,3	360,00	1180,80
Concreto usinado paredes, FCK 20MPa	90862	m ³	95,1	280,18	26633,35
Armadura paredes (100kg/m ³ , verg. 8mm)	91602	kg	9505,8	6,11	58080,44
Concreto escadas (int./ext.), FCK 20MPa	90862	m ³	2,8	280,18	784,50
Armadura escadas (100kg/m ³ , verg. 6,3mm)	91601	kg	280	6,79	1901,20
Concreto piso (espessura 10cm), FCK 20Mpa	90861	m ³	14,4	310,54	4471,78
Armadura piso (100kg/m ³ , vergalhão 6,3mm)	91601	kg	1440	6,79	9777,60
Espalhamento mat. escavação + compactação	74034/001	m ³	225	2,41	542,25
Concreto cobertura do solo compactado	90861	m ³	8,2	310,54	2531,68
Corrimões de aço	74195/001	m	12	267,45	3209,40
Tubo de PVC 100mm para teleflex	89714	m	82,6	40,80	3370,08
Joelhos 45º para tubos de PVC	3520	unitário	40	5,89	235,60
Cerca perímetro externo (30m lado, 2m alt.)	74143/001	m ²	240	43,01	10322,40
Portão para perímetro externo	74238/002	unitário	1	822,52	822,52
Aço para local de armazenamento da fonte	-	kg	588,8	3,00	3826,88
Armário de aço para kit de emergência	-	unitário	1	2000,00	2000,00
CUSTO TOTAL					128509,67

Fonte: Autor (2016)

A estimativa de custo total é de R\$128.509,67. Devido as grandes espessuras das paredes e profundidade do local, dificilmente a construção será removida (uma vez que necessita de explosivos e máquinas de escavação para desmontar o concreto). Assim, pode-se assumir que é uma construção definitiva.

4.1.4 Outros aspectos

Um aspecto importante é quanto à ergonomia da operação neste tipo de *bunker*. Para movimentar materiais de trabalho para dentro e para fora do *bunker*, o operador deve utilizar a escada. Caso tenha que levar a fonte para fora do *bunker*, cujo peso é de aproximadamente 20 kgf, pode causar lesões ao trabalhador ou exigir mais de uma pessoa para esta atividade. Uma alternativa é instalar uma talha ou elevador de carga para movimentar a fonte, assim não prejudica o trabalhador sob o ponto de vista de ergonomia.

4.2 BUNKER DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES DE CONCRETO

Este tipo de *bunker* não necessita de escavações, exceto pelo fato que a espessura das paredes seja tal que devido ao peso próprio e tipo de solo, sejam requeridas estruturas de apoio (escoras, sapatas, etc). Paredes de concreto são utilizados como blindagem para a radiação emitida no interior do *bunker*, sempre que houver atividade de gamagrafia.

Quando a campanha de inspeções por gamagrafia for concluída, pode-se optar por desmontar o *bunker* e reutilizar a área para outros fins. Nesse caso, é necessário destruir as paredes com uso de dinamite ou outro tipo de explosivo, o que pode acarretar em custos elevados, dependendo da espessura/altura da parede e do perímetro do *bunker*.

4.2.1 Layout da área

A Figura 13 mostra uma vista em corte do *bunker* de superfície com paredes de concreto. Quanto ao posicionamento da fonte, esta fica a uma altura do solo que é menor que a altura da parede de blindagem. Cada lado do *bunker* possui um tubo em “S” de PVC para a passagem do cabo telefex do irradiador, o qual é acionado externamente.

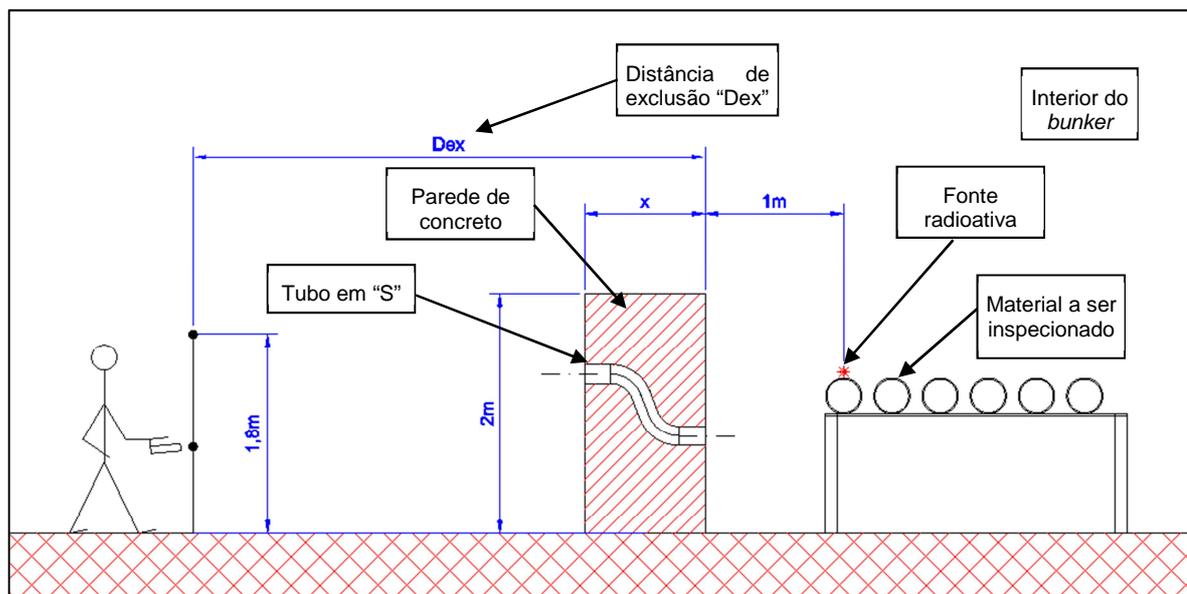


Figura 13 – Vista em corte do *bunker* de superfície (paredes de concreto)
Fonte: Autor (2016)

A Figura 14 mostra a vista de cima do *bunker*. O acesso se dá através de um labirinto, com largura interna de 0,8m. Possui uma porta de acesso, cujo fechamento é de responsabilidade do operador ou supervisor. A porta é construída em chapas de aço simples e possui o símbolo internacional de advertência de radiações ionizantes.

Na área externa, existe uma cerca de delimitação da área supervisionada, a qual possui um portão para entrada de caminhões. Para a realização de atividades de inspeção por gamagrafia, o acesso de pessoas não-autorizadas deve ser restringido através do fechamento do portão de ingresso. Os operadores deverão ficar fora da área controlada, cujo perímetro de exclusão será dado por cordas e/ou correntes. A movimentação da carga para dentro e para fora do *bunker* é realizada através de um caminhão com guindaste. Quanto à fonte radioativa, esta é armazenada em um local apropriado fora da área do *bunker*.

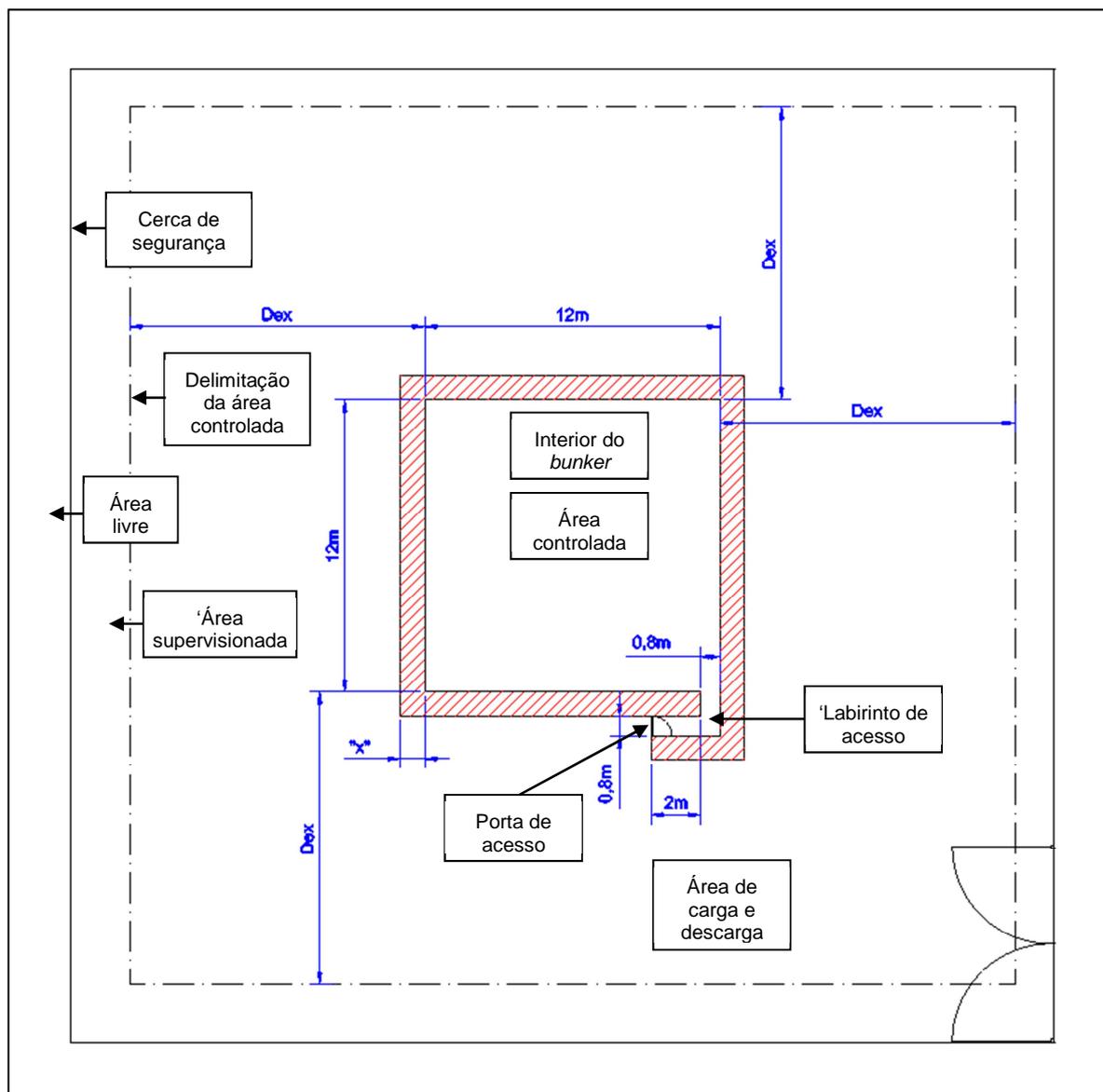


Figura 14 – Vista de cima do bunker de superfície (paredes de concreto)
Fonte: Autor (2016)

4.2.2 Cálculos de blindagem e espessura das paredes

Para efeitos de cálculo de blindagem, será utilizada a Equação 22 (taxa de exposição). Retomando as variáveis a serem consideradas no cálculo: “ x ” é a espessura da parede de concreto; “ H_p ” é o valor máximo da taxa de exposição que um indivíduo do público (que não faça parte da equipe de radiografia) está exposto, anualmente; “ H ” é a taxa de exposição sem barreira; “ T ” é o fator característico da emissão gama da fonte (significa a taxa de exposição para uma fonte de 1Ci a um metro de distância).

Com relação ao valor de “ H_p ”, considerando que a dose máxima prevista na legislação (CNEN, 2014a) é de 1mSv/ano = 0,1rem/ano, o valor máximo diário (para exposição de 5 horas por dia e 200 dias de trabalho por ano) é de 0,08 mrem/h.

Conforme ANDREUCCI (2016), o valor de “ Γ ” para uma fonte de irídio 192 é de 3,48 μ C/kg.h/GBq a 1m, ou 0,50R/h.Ci a 1m, ou 0,13 mSv/h.GBq a 1m. Também, o coeficiente de atenuação linear do concreto para o irídio 192 é $\mu=0,189\text{Ci}^{-1}$, para uma densidade de 2300kg/m³.

4.2.2.1 Cálculo da espessura da parede de concreto com uso de colimador

Outras considerações adotadas para o cálculo da espessura da parede com o uso de colimador são as seguintes:

- O uso do colimador com fator de redução (FR) mínimo de 32 será de uso obrigatório para todas exposições. Em hipótese alguma poderão ser feitos arranjos de peças (radiografar mais de uma peça com a mesma exposição).
- A distância mínima entre o operador e a fonte será de 13m (distância de exclusão “Dex” + 1m), conforme indicado na figura 4.3. Assim, a taxa de exposição para o indivíduo do público será de 0,08mrem/h.

A taxa de exposição sem barreira é calculada através da Equação 24:

$$H = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2 \cdot FR} = \frac{0,5.60}{13^2 \cdot 32} = 5,547\text{mR/h} \quad (\text{Eq. 24})$$

Através da Equação 4, e considerando-se que a intensidade da radiação é equivalente a taxa de dose, pode-se calcular a espessura da parede de concreto aproximada (Equações 25 e 26):

$$\ln(I) = \ln(I_0 e^{-\mu x}) \quad (\text{Eq. 25})$$

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,189} \cdot \ln \frac{5,547}{0,08} = 22,42\text{cm} \quad (\text{Eq. 26})$$

O próximo passo é calcular a correção da espessura “x” da parede com o fator de *build up* “B”. Considerando $\mu=0,189\text{cm}^{-1}$ e $x=22,42\text{cm}$, tem-se que $\mu \cdot x=4,23$. Consultando o Figura 7 – Gráfico do valor de “a” em função da energia da radiação (esquerda)

Figura 8 – Gráfico do valor de “b” em função da energia da radiação (direita)
Fonte: TAUHATA (2014)

, os valores de “a” e “b” para o irídio 192 (Energia = 0,65MeV) e blindagem de concreto são, respectivamente, 1,2 e 0,1.

Substituindo na Equação 12, tem-se a Equação 27:

$$B(4,23) = 1 + 1,2 \cdot 0,189 \cdot 22,42 \cdot e^{0,1 \cdot 0,189 \cdot 22,42} = 8,77 \quad (\text{Eq. 27})$$

Considerando a Equação 26, desta vez com correção devida a B (dada pela Equação 11), tem-se a Equação 28:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,189} \cdot \left(\ln \frac{5,547}{0,08} + \ln(8,77) \right) = 33,92\text{cm} \quad (\text{Eq. 28})$$

4.2.2.2 Cálculo da espessura da parede de concreto sem uso de colimador

Caso seja necessário fazer radiografias sem o uso de colimador, são apresentados os cálculos de espessura da parede. Considera-se o tempo de exposição de 5 horas para o operador, a uma distância de exclusão “Dex” de 13m, e uma taxa de dose de 0,08mrem/h.

A taxa de exposição sem barreira é dada pela Equação 29:

$$H = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} = \frac{0,5 \cdot 60}{13^2} = 177,5\text{mR/h} \quad (\text{Eq. 29})$$

A primeira aproximação da espessura “x” da parede de concreto pode ser assim calculada pela Equação 30:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,189} \cdot \ln \frac{177,5}{0,08} = 40,77 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 30})$$

Então, o valor de $\mu \cdot x = 7,7$. O valor de B pode ser encontrado, através de interpolação de “a” e “b” nos gráficos 2.1 e 2.2, pela Equação 31:

$$B(7,7) = 1 + 1,2 \cdot 0,189 \cdot 40,77 \cdot e^{0,1 \cdot 0,189 \cdot 40,77} = 20,98 \quad (\text{Eq. 31})$$

E o valor de espessura corrigida será dado pela Equação 32:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,189} \cdot \left(\ln \frac{177,5}{0,08} + \ln(20,98) \right) = 56,87 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 32})$$

Para fins de construção, será utilizada uma espessura de parede de 85cm de concreto ($x * 1,5$).

4.2.3 Relação de custos

Na Tabela 5 são apresentados os principais custos para a construção do *bunker* de superfície de concreto. Como para o bunker semi-enterrado, estimaram-se os custos com base na tabela SINAPI (CAIXA, 2016).

Tabela 5 – Custos de construção do *bunker* de superfície de concreto

Material	Índice Sinapi	Unid.	Quant.	Custo unitário [R\$]	Custo total [R\$]
Concreto usinado paredes, FCK 20MPa	90862	m ³	96,5	280,18	27022,80
Armadura paredes (100kg/m ³ , verg. 8mm)	91602	kg	9644,8	6,11	58929,73
Concreto piso (espessura 10cm), FCK 20MPa	90861	m ³	14,7	310,54	4555,00
Armadura piso (100kg/m ³ , verg. 6,3mm)	91601	kg	1466,8	6,79	9959,57
Tubo de PVC 100mm para teleflex	89714	m	16	40,80	652,80
Joelhos 45° para tubos de PVC	3520	unitário	40	5,89	235,60
Cerca perímetro externo (40m lado, 2m alt.)	74143/001	m	320	43,01	13763,20
Portão para perímetro externo	74238/002	unitário	1	822,52	822,52
Armário de aço para kit de emergência	-	unitário	1	2000,00	2000,00

CUSTO TOTAL**117941,22**

Fonte: Autor (2016)

O custo total estimado é de R\$117.941,22. Com relação à área ocupada por este local, considera-se um perímetro de segurança de 12m para fora com relação à parede interna do *bunker*. São acrescentados mais 2m de largura de faixa para movimentação dos operadores, e na borda deste perímetro é montada uma cerca definitiva. Esta cerca forma um quadrado de 40m de lado, resultando em uma área ocupada de 1600m². Devido às espessuras de parede de concreto, dificilmente o local será desmontado no final do período, constituindo assim uma construção definitiva.

4.3 *BUNKER* DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES DE AÇO

Este *bunker* difere ao anterior quanto ao material empregado nas paredes. Podem-se utilizar chapas de aço soldadas nas extremidades, ou mesmo encaixadas. Também é possível combinar espessuras em forma de “sanduíche”, caso a espessura calculada se mostre maior que aquelas disponíveis comercialmente ou mesmo por questões de custo. Para evitar problemas de corrosão, as chapas devem ser pintadas após a montagem.

A factibilidade deste tipo de construção depende da quantidade de aço utilizada, que determina o custo de construção. Caso seja factível, uma das principais vantagens deste tipo de *bunker* é que a remoção das paredes após o término da campanha de inspeções por gamagrafia é mais fácil quando comparado ao *bunker* de concreto. Além disso, as chapas de aço podem ser reutilizadas para outra finalidade ou, caso apresentem corrosão, podem ser vendidas como material para reciclagem.

4.3.1 Cálculos de blindagem e espessura das paredes

Será utilizado o mesmo procedimento de cálculo da blindagem em concreto, porém com as variáveis do aço.

Com relação ao coeficiente de atenuação linear do aço para o irídio 192, é utilizado o valor $\mu=0,600\text{Ci}^{-1}$, conforme ANDREUCCI (2016), para uma densidade de 7850kg/m^3 .

4.3.1.1 Cálculo da espessura da parede de aço com uso de colimador

Os cálculos apresentados seguem as mesmas considerações do item 4.2.1.

Através da Equação 4, e considerando-se que a intensidade da radiação é equivalente a taxa de dose, pode-se calcular a espessura da parede de aço aproximada pela Equação 33:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,600} \cdot \ln \frac{5,547}{0,08} = 7,06\text{cm} \quad (\text{Eq. 33})$$

O próximo passo é calcular a correção da espessura “x” da parede com o fator de build up “B”. Considerando $\mu=0,600\text{cm}^{-1}$ e $x=7,06\text{cm}$, tem-se que $\mu \cdot x=4,2$. Consultando os gráficos das Figuras 7 e 8, os valores de “a” e “b” para o irídio 192 (Energia=0,65MeV) e blindagem de ferro são, respectivamente, 1,1 e 0,025.

Substituindo na Equação 12, tem-se a Equação 34:

$$B(4,2) = 1 + 1,1 \cdot 0,600 \cdot 0,7 \cdot e^{0,025 \cdot 0,600 \cdot 0,7} = 6,18 \quad (\text{Eq. 34})$$

Considerando a Equação 33, desta vez com correção devida a B (dada pela Equação 11), tem-se a Equação 35:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,600} \cdot \left(\ln \frac{5,547}{0,08} + \ln(6,18) \right) = 10,1\text{cm} \quad (\text{Eq. 35})$$

4.3.1.2 Cálculo da espessura da parede de aço sem uso de colimador

A taxa de exposição sem barreira é dada pela Equação 29: $H=177,5\text{mR/h}$.

A primeira aproximação da espessura “x” da parede de concreto pode ser assim calculada pela Equação 36:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,600} \cdot \ln \frac{177,5}{0,08} = 12,84 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 36})$$

Então, o valor de $\mu \cdot x = 7,7$. O valor de B pode ser encontrado, através de interpolação de “a” e “b” nos gráficos das Figuras 7 e 8, pela Equação 37:

$$B(7,7) = 1 + 1,1 \cdot 0,600 \cdot 12,8 \cdot e^{0,025 \cdot 0,600 \cdot 12,8} = 11,28 \quad (\text{Eq. 37})$$

E o valor de espessura corrigida será dado pela Equação 38:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,600} \cdot \left(\ln \frac{177,5}{0,08} + \ln(11,28) \right) = 16,87 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 38})$$

A parede recomendada é de 25cm ($x * 1,5$).

4.3.2 Relação de Custos

Na Tabela 6 são apresentados os principais custos para a construção do *bunker* de superfície com paredes de aço. Os valores de referência foram obtidos na tabela SINAPI (CAIXA, 2016). O custo total estimado é de R\$ 1.275.428,69.

Tabela 6 – Custos de construção do *bunker* de superfície de aço

Material	Índice Sinapi	Unid.	Quant.	Custo unitário [R\$]	Custo total [R\$]
Paredes de aço	-	kg	207240	6,00	1243440,00
Concreto piso (esp. 10cm), FCK 20MPa	90861	m ³	14,7	310,54	4555,00
Armadura piso (100kg/m ³ , verg. 6,3mm)	91601	kg	1466,8	6,79	9959,57
Tubo de PVC 100mm para teleflex	89714	m	16	40,80	652,80
Joelhos 45º para tubos de PVC	3520	unitário	40	5,89	235,60
Cerca perímetro ext.(40m lado, 2m alt.)	74143/001	m	320	43,01	13763,20
Portão para perímetro externo	74238/002	unitário	1	822,52	822,52

Armário de aço para kit de emergência	-	unitário	1	2000,00	2000,00
CUSTO TOTAL					1.275.428,69

Fonte: Autor (2016)

Este tipo de construção apresenta algumas vantagens sobre as alternativas anteriores, como a possibilidade de montar as paredes com combinação de chapas de diferentes espessuras, facilidade de montagem, possibilidade de reciclar o aço após a desmontagem do *bunker*, etc. Contudo, devido ao custo do aço necessário para a construção, esta alternativa pode se tornar proibitiva quando comparada às outras.

4.4 BUNKER DE SUPERFÍCIE, COM PAREDES COMPOSTAS

Normalmente os *bunkers* para atividades de radiologia industrial são construídos em materiais apresentados nos parágrafos anteriores. A inovação proposta neste trabalho é a utilização de água como blindagem.

4.4.1 Layout da Área

Nesta proposta de *bunker*, blindagem é composta de paredes interna e externa de aço, com um vazio no meio. Este vazio é preenchido por água, conforme mostrado na Figura 15.

Diferentemente das propostas anteriores, este tipo de *bunker* possui geometria circular, com paredes concêntricas. O acesso de pessoal e da fonte se dá através de uma escada de aço, radial, com trecho interno e externo, que passa por cima da parede (Figura 16). Existem tubos em formato “ômega” invertidos para passagem do cabo telefex do irradiador, que também passam por cima da parede.

Entre as paredes, deve ser colocada uma lona plástica para impermeabilização, e então é preenchida de água. Dependendo da espessura da parede de água, pode-se optar por paredes de aço com reforços estruturais ou

mesmo aumentar a espessura destas. Todavia, o cálculo estrutural não é objeto de estudo neste trabalho.

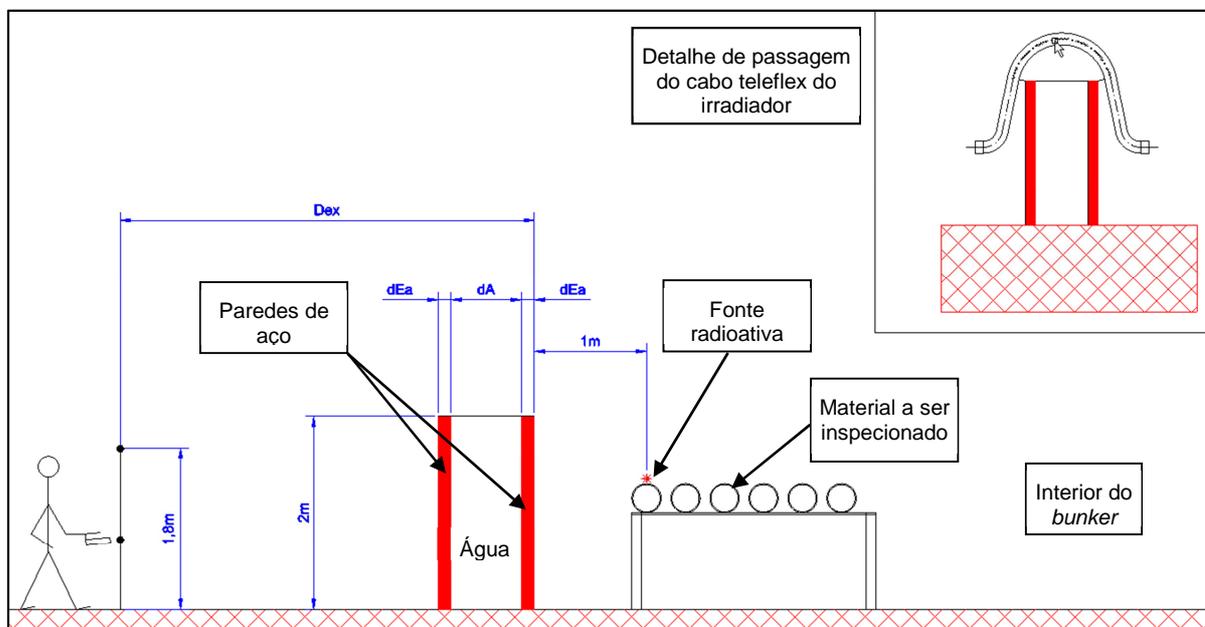


Figura 15 – Vista em corte do *bunker* de superfície (parede composta)
Fonte: Autor (2016)

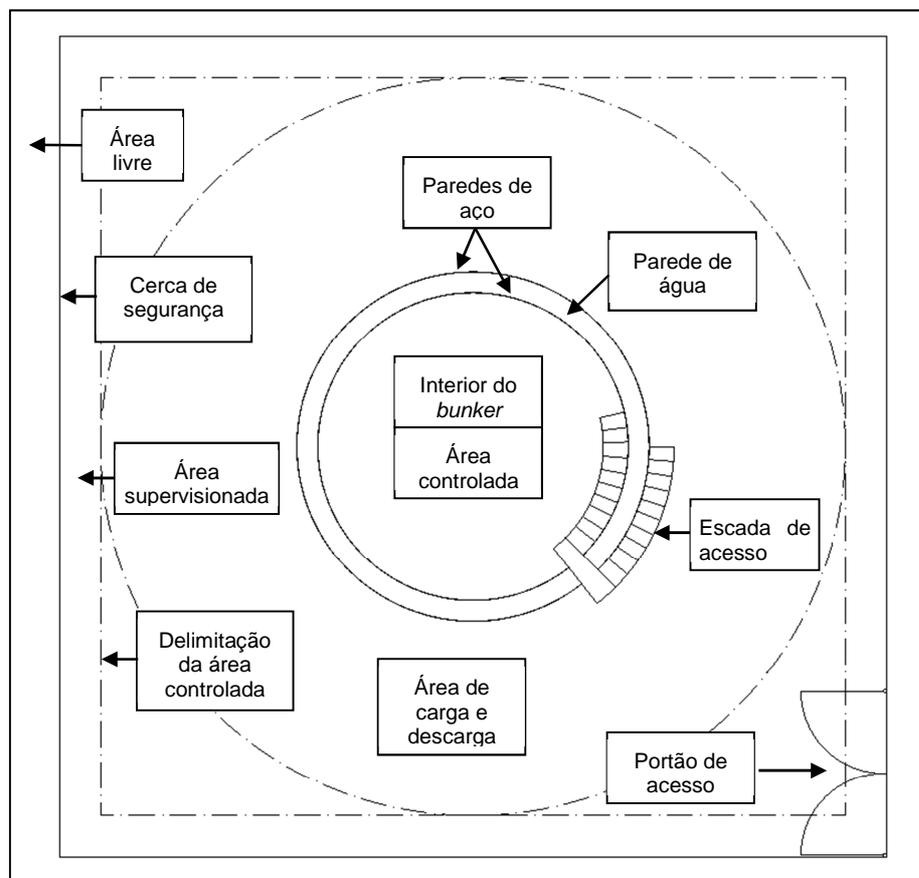


Figura 16 – Vista de cima do *bunker* de superfície (parede composta)
Fonte: Autor (2016)

A desvantagem deste *bunker* é o fato de ter de movimentar a fonte para dentro e para fora através de uma escada. Pode-se optar por armazenar a fonte em um cofre na parte interna do *bunker*, desde que se respeitem os critérios de segurança e proteção da fonte contra as intempéries e umidade. Com relação à área supervisionada e para carga e descarga de material de inspeção, a mesma é cercada e possui um portão de acesso, que deve ser controlado pelo operador ou supervisor.

4.4.2 Cálculos de Blindagem e Espessura das Paredes

Para o cálculo da blindagem deste tipo de *bunker*, considera-se a barreira devido às espessuras da chapa de aço e a barreira devido à massa de água. A Figura 17 ilustra as atenuações proporcionadas por esta blindagem, com algumas

simplificações: as chapas de aço podem constituir uma única massa, de espessura $2 \cdot x_{\text{aço}}$ e a massa de água constitui a segunda barreira. No cálculo, a espessura do aço é mantida fixa e a espessura da parede de água é a variável que se deseja encontrar.

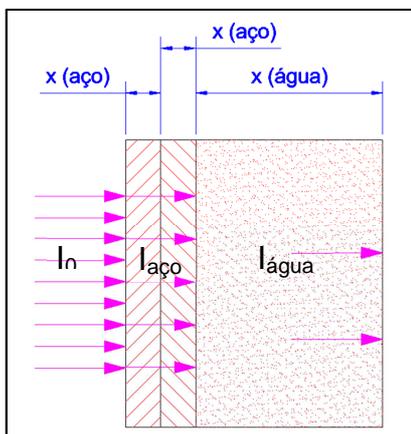


Figura 17 – Considerações para cálculo da parede composta
Fonte: Autor (2016)

Com relação ao coeficiente de atenuação linear, é possível calculá-lo a partir da informação da camada semi-redutora (Equação 6), para uma blindagem de boa geometria. Conforme ICRP 33 (1981), o valor da camada semi-redutora para a água é de 6,42cm. Assim, pela Equação 39:

$$\mu = \frac{0,693}{6,42} = 0,1079 \text{ cm}^{-1} \quad (\text{Eq. 39})$$

4.4.2.1 Cálculo da espessura da parede de água com uso de colimador

Inicia-se estimando uma espessura de parede de aço, neste caso o valor utilizado será de 12,5mm, que é facilmente encontrado no comércio. Assim, a espessura total do aço é de $2 \times 12,5 = 25\text{mm} = 2,5\text{cm}$. A atenuação dada por essa barreira é dada pela Equação 40:

$$I_{\text{aço}} = \frac{I_0}{FR} e^{-\mu x} = \frac{177,5}{32} \cdot e^{-0,62,5} = 1,238 \text{ mR} \quad (\text{Eq. 40})$$

Então calcula-se a espessura da parede de água, necessária para atenuar a radiação gama compatível com uma taxa de exposição de indivíduo do público, através da Equação 41:

$$x_{\text{água}} = \frac{1}{\mu_{\text{água}}} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,1079} \cdot \ln \frac{1,238}{0,08} = 25,37 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 41})$$

O próximo passo é calcular a correção da espessura “x” da parede com o fator de build up “B”.

O valor de $B_{\text{aço}}$, através de “a” (1,1) e “b” (0,025) nos gráficos 1 e 2, pode ser calculado pela Equação 42:

$$B_{\text{aço}}(1,5) = 1 + 1,1 \cdot 0,625 \cdot e^{0,025 \cdot 0,625} = 2,71 \quad (\text{Eq. 42})$$

A intensidade de radiação que atravessa a parede de aço, corrigida com o fator de *build up*, pode ser assim determinada, através da Equação 43:

$$I_{\text{aço}} = \frac{177,5}{32} \cdot e^{-0,625} \cdot 2,71 = 3,36 \text{ mR} \quad (\text{Eq. 43})$$

O valor de $B_{\text{água}}$, através de “a” (1,3) e “b” (0,12) nos gráficos 1 e 2, pode ser calculado pela Equação 44:

$$B_{\text{água}}(2,74) = 1 + 1,3 \cdot 0,1079 \cdot 25,4 \cdot e^{0,12 \cdot 0,1079 \cdot 25,4} = 5,95 \quad (\text{Eq. 44})$$

Então, a espessura da parede de água com fator de build up, necessária para atenuar a radiação gama compatível com uma taxa de exposição de indivíduo do público, é dada pela Equação 45:

$$x_{\text{água}} = \frac{1}{\mu_{\text{água}}} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,1079} \cdot \left(\ln \frac{3,36}{0,08} + \ln 5,95 \right) = 51 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 45})$$

Pode-se considerar um valor mínimo de espessura da parede de água de 51cm.

4.4.2.2 Cálculo da espessura da parede de água sem uso de colimador

A atenuação dada pela barreira de aço pode ser calculada simplesmente desconsiderando a atenuação dada pelo uso do colimador, através da Equação 46:

$$I_{aço} = I_0 \cdot e^{-\mu x} = 177,5 \cdot e^{-0,6,2,5} = 39,6mR \quad (\text{Eq. 46})$$

Então calcula-se a espessura da parede de água, necessária para atenuar a radiação gama compatível com uma taxa de exposição de indivíduo do público, pela Equação 47:

$$x_{água} = \frac{1}{\mu_{água}} \cdot \ln \frac{H}{H_p} = \frac{1}{0,1079} \cdot \ln \frac{39,6}{0,08} = 57,5cm \quad (\text{Eq. 47})$$

O valor de $B_{aço}$ é de 2,72, como calculado anteriormente através da Equação 43. A intensidade de radiação que atravessa a parede de aço, corrigida com o fator de build up, é calculada então, pela Equação 48:

$$I_{aço} = 177,5 \cdot e^{-0,6,2,5} \cdot 2,72 = 107,5mR \quad (\text{Eq. 48})$$

O valor de $B_{água}$, através de “a” (1,3) e “b” (0,12) nos gráficos 1 e 2, pode ser calculado através da Equação 49:

$$B_{água}(6,20) = 1 + 1,3 \cdot 0,1079 \cdot 57,5 \cdot e^{0,12 \cdot 0,1079 \cdot 57,5} = 18 \quad (\text{Eq. 49})$$

Então, a espessura da parede de água com fator de build up, necessária para atenuar a radiação gama compatível com uma taxa de exposição de indivíduo do público, pela Equação 50:

$$x_{\text{água}} = \frac{1}{\mu_{\text{água}}} \cdot \left(\ln \frac{H}{H_p} + \ln B \right) = \frac{1}{0,1079} \cdot \left(\ln \frac{107,5}{0,08} + \ln 18 \right) = 93 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 50})$$

Então, sem a utilização do colimador, pode-se considerar uma espessura mínima da parede de água de 1,4m ($x_{\text{água}} * 1,5$).

4.4.3 Relação de Custos

Na Tabela 7 são apresentados os principais custos para a construção do *bunker* de superfície de parede composta (aço + água + aço). Assim como em 4.3.3, os valores de referência foram obtidos na tabela SINAPI (CAIXA, 2016). O custo total estimado é de R\$ 163.358,06.

Tabela 7 – Custos de construção do *bunker* de superfície de parede composta

Material	Índice Sinapi	Unid.	Quant.	Custo unitário [R\$]	Custo total [R\$]
Paredes de aço	-	kg	20222,4	6,00	121334,59
Paredes de água	-	m ³	139,1	0,25	34,78
Impermeabilização entre paredes de aço		m ²	1,0	10000,00	10000,00
Concreto piso (esp. 10cm), FCK 20MPa	90861	m ³	14,7	310,54	4555,00
Armadura piso (100kg/m ³ , verg. 6,3mm)	91601	kg	1466,8	6,79	9959,57
Tubo de PVC 100mm para teleflex	89714	m	16,0	40,80	652,80
Joelhos 45° para tubos de PVC	3520	unitário	40,0	5,89	235,60
Cerca perímetro ext. (40m lado, 2m alt.)	74143/001	m	320,0	43,01	13763,20
Portão para perímetro externo	74238/002	unitário	1,0	822,52	822,52
Armário de aço para kit de emergência	-	unitário	1,0	2000,00	2000,00
CUSTO TOTAL					163358,06

Fonte: Autor (2016)

Tal como no *bunker* de paredes de concreto de superfície, considera-se um perímetro de segurança de 12m para fora com relação à parede interna do *bunker*. São acrescentados mais 2m de largura de faixa para movimentação dos operadores, e na borda deste perímetro é montada uma cerca definitiva. A área resultante é um quadrado de 40m de lado e 1600m².

A vantagem desta construção com relação às demais é que, uma vez concluídas as atividades de gamagrafia, pode ser desmantelado facilmente, através do corte das juntas soldadas. O material metálico pode ser reciclado ou reutilizado em outra construção, contribuindo com a preservação do meio-ambiente e abatendo parte do custo inicial.

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA

A Tabela 8 apresenta uma comparação entre os diversos tipos de construção de *bunker* para gamagrafia propostos neste trabalho. Todos satisfazem os requisitos de proteção radiológica, porém existem diferenças que devem ser consideradas no momento da escolha do projeto.

Do ponto de vista de custo, os *bunkers* de superfície de paredes de concreto, o semi-enterrado e o de paredes compostas possuem custos na mesma ordem de grandeza. O *bunker* de superfície com paredes compostas possui um custo 38,5% maior em relação ao *bunker* de superfície de paredes de concreto, o qual possui o menor valor de construção. O *bunker* de superfície de paredes de aço tem o custo cerca de 10 vezes maior, devido à quantidade de aço que deve ser empregada como barreira de atenuação da radiação.

Sob o aspecto de ergonomia, os mais indicados são os de superfície (de paredes de concreto ou o de paredes de aço), pois facilitam o transporte da fonte de gamagrafia (pode-se utilizar um carrinho, que não requer grandes esforços do operador para manusear).

Com relação à área de trabalho, o *bunker* com paredes compostas é o que possui a maior área. O diâmetro interno é maior que a largura das paredes dos outros, de modo a compensar eventuais diminuições de espaço devido à geometria

da construção. O *bunker* semi-enterrado possui 134,4m² de área interna, pois foi subtraída a área ocupada pela escada de acesso (9,6m²).

Com relação à aplicabilidade, pode-se observar o que segue:

- O *bunker* semi-enterrado é adequado como instalação definitiva ou quando a fonte radioativa possui um alto valor de atividade (até mesmo maiores que a da fonte utilizada, de 60Ci), ou seja, para espessuras maiores do material a ser inspecionado;
- O *bunker* de superfície, de paredes de concreto, é adequado para atividades que necessitem de uma instalação de baixo custo inicial, com limitação da atividade da fonte, mas de caráter definitivo.
- O *bunker* de superfície, de paredes de aço, é indicado pela rapidez de montagem e desmontagem, e possibilidade de reciclagem ou re-utilização do material;
- O *bunker* de superfície, de paredes compostas (aço + água + aço) é indicado para situações em que é necessária uma instalação provisória e com um custo moderado. Além disso, o aço utilizado nas paredes pode ser reciclado no momento da desmontagem da estrutura.

Tabela 8 – Comparativo entre as diversas características dos projetos propostos

Característica	<i>Bunker semi-enterrado</i>	<i>Bunker de superfície, de concreto</i>	<i>Bunker de superfície, de aço</i>	<i>Bunker de superfície, de paredes compostas (aço + água + aço)</i>
Material da blindagem	Paredes de concreto + solo compactado	Paredes de concreto	Chapas de aço	Chapas de aço + parede de água
Custo construção	R\$ 128.509,67	R\$ 117.941,22	R\$ 1.275.428,69	R\$ 163.358,06
Área de inspeção	134,4m ²	144m ²	144m ²	176m ²
Área total ocupada	900m ²	1600m ²	1600m ²	1600m ²
Aspectos ergonômicos	Presença de escada, que pode dificultar transporte da fonte	-	-	Presença de escada, que pode dificultar transporte da fonte
Riscos	Radiológicos: exposição a raios gama Mecânicos: risco de quedas (escada)	Radiológicos: exposição a raios gama	Radiológicos: exposição a raios gama	Radiológicos: exposição a raios gama Mecânicos: risco de quedas (escada)
Desmontagem/demolição	Difícil. Necessidade de explosivos para abater paredes e aterrar o <i>bunker</i>	Média. Necessidade de explosivos para abater paredes. Piso pode permanecer.	Fácil. Necessário apenas remover soldas das chapas para desmontar paredes. Piso pode permanecer.	Fácil. Necessário apenas remover água e soldas das chapas para desmontar paredes. Piso pode permanecer.

Fonte: Autor (2016)

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram analisadas algumas propostas de projeto de instalações para gamagrafia industrial (*bunkers*), principalmente sob o ponto de vista de segurança radiológica do trabalhador. A blindagem destas soluções foi dimensionada de modo a propiciar doses de exposição compatíveis com a legislação vigente, as normas CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014a) e CNEN NE 3.02 (CNEN, 1988), seguindo o método de cálculo segundo considerações de proteção radiológica.

Foram identificadas duas alternativas às soluções clássicas de projeto de instalações: *bunker* de superfície de paredes de aço e *bunker* de paredes compostas (aço e água). O primeiro revelou-se com o custo de construção mais alto entre todos, cerca de 11 vezes maior que o *bunker* de superfície de paredes de concreto, embora com a vantagem de que suas paredes possam ser recicladas no momento da demolição. Contudo, foi a solução de base para a proposta do *bunker* de parede composta, o qual apresenta um custo moderado e com duas grandes vantagens: sua demolição no final do período de inspeções é relativamente fácil de ser realizada, e o material das paredes pode ser utilizado em outras obras ou mesmo com reciclagem.

Para o problema que se propôs neste trabalho, de uma instalação provisória para inspeção de tubulações na construção de uma planta de celulose, por gamagrafia industrial, o *bunker* de paredes compostas é a alternativa mais recomendada, pela sua simplicidade, custo e vida útil.

Como sugestões de trabalhos futuros, podem-se citar:

- Comparações de medições práticas com valores calculados das taxas de exposição, após a construção de determinado tipo de *bunker*. Lembrando que, para fins de credenciamento da instalação junto ao CNEN, deverão ser feitas medições para comprovar a atenuação da blindagem, conforme norma CNEN NE 6.02 (CNEN, 2014b);
- Análise da influência do efeito *skyshine*, que é a radiação espalhada no ar acima da fonte radioativa, que pode produzir um sinal na instrumentação de detecção de radiação. Considerações sobre este efeito são feitas na NCRP 51 (NCRP, 1977);

- Utilização de Método de Monte Carlo para cálculo de probabilidade de distribuição da radiação gama e otimização do projeto de blindagem e comparação com o método clássico, através de um código de cálculo, como o *Monte Carlo N-Particle Transport Code* (LANL, 2005).

REFERÊNCIAS

ANDREUCCCI, Ricardo. **Radiologia Industrial**. Abendi - Associação Brasileira Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. São Paulo. 2014.

ANDREUCCCI, Ricardo. **Proteção Radiológica**. Abendi - Associação Brasileira Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. São Paulo. 2016.

BECQUEREL, Antoine Henri. **Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents**. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'Académie des Sciences, Paris, France, 1896 (3 March), vol. 122, nº 9, pp. 501-503.

BITELLI, Thomaz, **Física e Dosimetria das Radiações**, 2ª Edição, Editora Atheneu, São Paulo, 2006.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE, Portaria Federal nº 453, de 01 de Junho de 1998.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO, Portaria Federal nº 3393, de 17 de Dezembro de 1987.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO, Norma Regulamentadora nº15: Atividades e Operações Insalubres, de 10 de Novembro de 2015a.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO, Norma Regulamentadora nº18: Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção, de 15 de Dezembro de 2015b.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI**, Abril de 2016, disponível em <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>, acesso em 18/05/2016.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Instalações Autorizadas para Radiografia Industrial**, disponível em <http://www.cnen.gov.br/instalacoes-autorizadas>, acesso em 27/03/2016.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**, publicada no Diário Oficial da União em 11/03/2014a, disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Norma CNEN NE 3.02 – Serviços de Radioproteção**, publicada no Diário Oficial da União em 01/08/1988, disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm302.pdf>

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Norma CNEN NE 6.02 – Licenciamento de Instalações Radioativas**, publicada no Diário Oficial da União em 29/04/2014b, disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm602.pdf>

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Norma CNEN NN 6.04 – Funcionamento de Serviços de Radiografia Industrial**, publicada no Diário Oficial da União em 25/03/2013, disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm604.pdf>

CURIE, Pierre; Curie, Marie Sklodowska; Bémont, G. **Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende**. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, France, 1898 (26 December), vol. 127, pp. 1215-1217.

FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO, **Telecurso 2000**, Módulo Profissionalizante, Ensaios Não Destrutivos, São Paulo, 2007.

HELLIER, Charles. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw-Hill. Nova York, 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), Training Course Series nº3, **Industrial Radiography**, Training Guidelines in Non Destructive Testing Techniques, Viena, Áustria, 1992.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), **Categorization of Radioactive Sources**, Safety Guide RS-G-1.9, Viena, Áustria, 2005.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION, **ICRP Publication 21**, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION, **ICRP Publication 26**, Recommendations of the International Commission of Radiological Protection, 1977.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION, **ICRP Publication 33**, Recommendations of the International Commission of Radiological Protection, 1981.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC), **The Periodic Table of the Elements**, disponível em http://iupac.org/publications/ci/2004/2601/2_holden.html, acesso em 27/03/2016.

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY (LANL), **Periodic Table of elements, Iridium** – material disponível em <http://periodic.lanl.gov/77.shtml>, acesso em 27/03/2016.

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY (LANL), **MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5**, X-5 Monte Carlo Team, Oak Ridge, USA, 2005.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, **NCRP Report No. 51**, Radiation protection design guidelines for 0.1–100 MeV particle accelerator facilities, Washington, D.C., USA, 1977.

RUTHERFORD, Ernest; SODDY, Frederick. **The Cause and Nature of Radioactivity**. Philosophical Magazine 4, London, UK, 1902, pp. 370-396.

TAUHATA, Luiz; Salati, Ivan P.A.; Prinzio, Renato; **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**; 10ª Edição, IRD/CNEM, Rio de Janeiro, 2014.