



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

FRANCISCO ANTONIO RIBEIRO GOMES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CASTELO DE CHUMBO PARA
PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

FORTALEZA

2019

FRANCISCO ANTONIO RIBEIRO GOMES

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CASTELO DE CHUMBO PARA PROTEÇÃO
RADIOLÓGICA

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como Requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369p Ribeiro Gomes, FranciscoAntonio.
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CASTELO DE CHUMBO PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA /
FranciscoAntonio Ribeiro Gomes. – 2019.
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

1. Ensaio Não Destrutivo. 2. Raio-X. 3. Proteção Radiológica. I. Título.

CDD 669

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CASTELO DE CHUMBO PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como Requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (DEMM/UFC)

Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos
Universidade Federal do Ceará (DEMM/UFC)

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará (DEMM/UFC)

A Deus, a minha mãe, esposa e as
minhas irmãs que sempre deram apoio
aos meus desafios.

AGRADECIMENTOS

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pelo acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao Prof. Dr. Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva e Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha família Maria das Dores, Mara Carolina, Miria Raquel, Carolina Nunes, Gabriel, Cleiton Lobo, Catarina, Arthur, Mirian Lopes e Antônio Emidio e aos meus sogros Isameire e Jesus Nazareno, além de “Dona” Maria e Edberto por todo apoio e compreensão.

Meus agradecimentos aos amigos Emanuel Seixas, Eudes Rodrigues, Diego Irineu, Henrique Alencar, Francisco Diego, Bruno Minely, Pablo Leão, Darley Lima, Alexya e Elineudo Pinho de Moura, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

Agradeço a todos os professores por proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem feito a aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

RESUMO

A radiografia industrial é um ensaio não destrutivo (END) que utiliza radiação X ou gama e se baseia na absorção diferenciada sofrida por essa radiação em virtude de variações na densidade ou na espessura do material ou peça inspecionada. Instalações onde se armazenam e utilizam fontes de radiação gama ou equipamentos geradores de raios X devem aplicar sistema de segurança que garantam a proteção dos membros do público e dos indivíduos ocupacionalmente expostos à radiação. O uso de blindagem, o controle da distância e do tempo de exposição são os fatores empregados para atenuar a radiação a níveis seguros e evitar os danos irreversíveis provocados pela exposição à radiação. Este trabalho apresenta um estudo de proteção radiológica e aborda desde o projeto e confecção por fundição de tijolos e placas de chumbo até a montagem do castelo de chumbo para acomodação e utilização segura do equipamento gerador de raios X. São apresentados os cálculos realizados para o dimensionamento dos elementos estruturais do castelo de chumbo que complementa a proteção promovida pelas paredes revestidas com barita do *bunker* que abriga o equipamento gerador de raios X em que serão realizados os ensaios radiográficos.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo. Raios X. Proteção radiológica. Blindagem. Castelo de chumbo.

ABSTRACT

Industrial radiography is a non-destructive test (NDT) that uses X or gamma radiation and is based on the differential absorption suffered by that radiation by virtue of variations in density or thickness of the inspected material or part. Installations where gamma ray sources or X-ray generating equipment are stored and used shall implement a safety system to ensure the protection of members of the public and individuals occupationally exposed to radiation. The use of shielding, distance control and exposure time are the factors used to attenuate radiation to safe levels and prevent irreversible damage from exposure to radiation. This work presents a radiological protection study and deals with the design and preparation by casting of bricks and lead plates up to the assembly of the lead castle for accommodation and safe use of the X-ray generating equipment. The calculations performed for the dimensioning of the structural elements of the lead castle that complements the protection promoted by the barite lined walls of the bunker that houses the X-ray generating equipment where the radiographic tests will be carried out

Keywords: Non-destructive testing. X-rays. Radiation protection. Shielding. Castle of lead.

Índice de figuras

Figura 1 – Técnica de ensaio radiográfico.....	4
Figura 2 – Radiografia de um cordão de solda com defeito longitudinal.....	6
Figura 3 – Poder de penetração da radiação	8
Figura 5 – Geração de raios X.....	11
Figura 6 – Efeito fotoelétrico.....	12
Figura 7 – Radiação de frenamento	12
Figura 8 – Tubo de Coolidge	13
Figura 9 – Fator de redução da exposição	18
Figura 10 – Atenuação da radiação.....	19
Figura 11 – Classificação da área de trabalho	21
Figura 12 – Equipamento Gerador de Raios X de fabricação XYLON	22
Figura 13 – Planta baixa do bunker	24
Figura 15 – Macho em fibra de vidro utilizado para fabricação do molde em areia. Erro!	
Indicador não definido.	
Figura 16 – Molde para produção das Chapas de chumbo.....	27
Figura 18 – Chapas de chumbo produzido por fundição em molde metálico.	31
Figura 21 – Castelo de chumbo	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo Geral	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. ENSAIO RADIOGRÁFICO	Erro! Indicador não definido.
3.1. Radiação Gama	9
3.2. Radiação X	10
3.3. Proteção radiológica	14
3.4. Controle das Radiações Ionizantes	16
3.4.1. Distância	17
3.4.2. Blindagem	18
3.4.3. Tempo exposição	19
3.4.4. Classificação das áreas de trabalho	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Equipamento gerador de raios X	22
4.2. Moldes para fundição	25
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	28
6. CONCLUSÃO	38
7. REFERÊNCIAS	39
ANDREUCCI, Ricardo. Radiologia Industrial. Abende, 2009.	39
ANDREUCCI, Ricardo. Proteção Radiológica. Abende, 2009.	39
Nondestructive Testing Handbook, Volume 4 - Radiographic Testing, 3ª. ed., 2002	39
International Atomic Energy Agency (IAEA) Noções de Proteção Radiológica ...	39
HELLIER , Charles J. Handbook Of Nondestructive Evaluation, 2003.	39
Norma CNEN NN 3.01, Resolução CNEN 164/14, Diretrizes básicas de proteção radiológica.	39
Norma CNEN NN 6.02, Licenciamento de Instalações Radiativas (Resolução CNEN 166/14)	39
http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Tahuata_Fundamentos.pdf	39

1. INTRODUÇÃO

São considerados ensaios não destrutivos (END) aqueles que inspecionam um material, peça, equipamento ou estrutura sem impedir seu uso posterior e tão pouco alterar suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Esses ensaios são utilizados na indústria aeronáutica, siderúrgica, naval, metal mecânica e de óleo e gás, para inspeção de componentes e equipamentos durante sua fabricação e em serviço, controle dos processos, redução dos custos de produção e garantia da qualidade do produto. Tais métodos têm como objetivo a detecção e dimensionamento de descontinuidades, tais como: porosidades, bolhas, inclusões, corrosão, entre outras.

Os principais ensaios não destrutivos são: ensaio visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrassom e radiografia. A radiografia industrial utilizada na inspeção de equipamentos baseia-se no mesmo princípio da radiografia empregada na medicina e consiste na absorção diferenciada da radiação (raios X ou gama) pelo material analisado. Por conseguinte, diferenças na intensidade da radiação transmitida produz uma imagem ao sensibilizar um filme fotográfico ou detector. As principais desvantagens do ensaio são o custo elevado do equipamento e principalmente o uso de radiação ionizante, o que implica na necessidade de medidas de segurança. Distância, blindagem e limitação do tempo de exposição são as medidas empregadas para o controle das radiações ionizantes. O controle de distância da fonte de radiação tem baixo custo e é o meio mais prático e rápido de ser empregado numa situação normal ou de emergência [ANDREUCCI. Abende, 2009A.]. A blindagem é um método mais complexo, pois envolve custos mais elevados, áreas para construção, aprovação do projeto pelo órgão competente, porém é um meio eficaz que permite o trabalho utilizando fontes com altas intensidades de radiação, com um máximo de segurança radiológica. Existem várias formas de blindagem, podemos citar como exemplos: coletes de proteção, portas revestidas com chumbos e janelas plumbíferas e castelo de chumbo.

Neste trabalho foi realizado um estudo para aumentar a segurança radiológica nas áreas próximas ao equipamento gerador de raios X instalado no Centro de Ensaios Não Destrutivos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC. A solução proposta envolve o projeto e a confecção, por fundição, de tijolos e placas de chumbo utilizados na montagem de um castelo de chumbo que abriga o equipamento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Construir um castelo de chumbo para permitir a operação segura do equipamento gerador de raios X instalado no Centro de Ensaios Não Destrutivos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFC.

2.2. Objetivos Específicos

- 1) Projetar um castelo de chumbo capaz de garantir proteção radiológica aos indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público;
- 2) Confeccionar, por fundição, os componentes, tijolos e placas de chumbo, necessários à montagem do castelo de chumbo;

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ENSAIO NÃO DESTRUTIVOS

A definição entre a escolha do método de ensaio a ser utilizado está vinculada a diversos fatores, tais como: material a ser inspecionado, tipo de propriedade a ser verificado, custo de realização do ensaio, mão de obra especializada, instalações para realização do ensaio, entre outros. A escolha por um determinado procedimento em detrimento de outros métodos é realizada através das possibilidades de detecção que este ensaio é capaz de fornecer. Caso mais de um método possua essa capacidade, pode-se escolher o que mais se adapte a realidade de inspeção. Outro fator que pode ser levado em consideração é a velocidade com que o ensaio é realizado podendo gerar uma automatização, incorporação ao processo de fabricação e até mesmo no controle de produção, desde que, obviamente, seja economicamente viável.

Como já mencionado anteriormente, dentre as principais técnicas de ensaio não destrutivos podemos destacar: ensaios ensaio visual, líquidos penetrantes e partículas magnéticas cujo objetivo principal é inspecionar discontinuidades observadas na superfície externa ou sub superficial da peça e para inspeção de discontinuidades observadas no interior dos materiais são exemplos: ensaio por ultrassom, ensaio radiográfico e emissão acústica. O ensaio visual é o mais simples e barato em comparação aos demais, sendo importante na condução para outros ensaios. Logo, não pode ser utilizado na inspeção de peças com elevado grau de responsabilidade. O ensaio de estanqueidade é realizado com a finalidade de verificar vazamento de líquidos ou gases em vasos de pressão, tanques e tubulações, por exemplo. Os resultados são rápidos e de fácil interpretação. No entanto, só podem ser utilizados para detectar defeitos passantes. O ensaio por líquidos penetrantes é o mais utilizado na indústria por sua simplicidade, confiabilidade, fácil interpretação e baixo custo. Embora seja simples o ensaio por líquidos penetrantes é capaz de revelar discontinuidades da ordem de 0.001 mm de abertura. No entanto, sua principal desvantagem a capacidade de detectar apenas discontinuidades superficiais. A avaliação por partículas magnéticas utiliza um campo magnético aplicado ao material analisado para revelar discontinuidades através da detecção de um campo de fuga produzido pelas próprias discontinuidades. Descontinuidades superficiais e subsuperficiais podem ser detectadas por este método, porém, tal método só pode ser aplicado em materiais ferromagnéticos e peças com geometrias complexas dificulta a análise. O ensaio por ultrassom é utilizado para detecção de discontinuidades internas (poros, trincas, penetração de solda entre outras), para

detectar corrosão e medida de espessura. Este método pode ser utilizado em materiais metálicos e não metálicos, assim como em estruturas de geometria complexa. No entanto, os custos envolvidos no treinamento do profissional e dos equipamentos utilizados são mais caros. O ensaio por emissão acústica também é capaz de detectar defeitos internos através de ondas sonoras emitidas pela própria descontinuidade presente em uma peça, equipamento ou estrutura submetida a uma solicitação térmica ou mecânica, por exemplo. Esse tipo de ensaio pode ser usado para analisar, em tempo real, peças de grandes dimensões, como tanques, tubulações, guindastes, pontes, viadutos, barragens, etc. Entretanto, o ensaio por emissão acústica não é capaz de dimensionar ou determinar a morfologia da descontinuidade e para isso requer a aplicação de ensaios não destrutivos complementares, por exemplo, ultrassom. Ruídos excessivos podem interferir ou inviabilizar o ensaio.

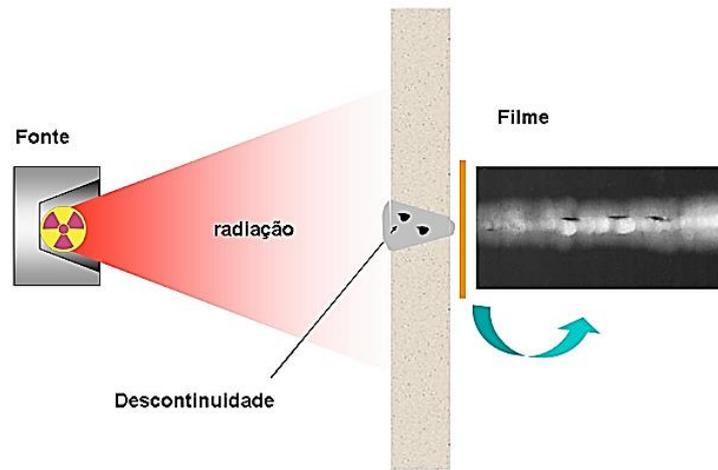
3. ENSAIO RADIOGRÁFICO

O ensaio radiográfico é um método não destrutivo amplamente utilizado para exame volumétrico, que utiliza ondas de raios X ou raios gama para produzir uma imagem radiográfica de um objeto mostrando diferenças na espessura, defeitos (internos e superficiais), mudanças na estrutura, detalhes de montagem, etc.

Esse procedimento se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça inspecionada, onde, os feixes de raios X ou radiação gama, gerados por uma fonte, irão incidir no objeto de estudo e devido às diferenças na densidade variações na espessura do material absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. A variação na quantidade de radiação absorvida será detectada por um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou dispositiva eletrônica de detecção de imagem radiográfica e irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou defeito no material.

O procedimento usual para produzir uma radiografia é ter uma fonte de radiação penetrante (ionizante) (raios X ou raios gama) em um lado do objeto a ser examinado e um detector da radiação do outro lado, como mostrado na Figura 1. O nível de energia da radiação deve ser bem escolhido de forma que radiação suficiente seja transmitida através do objeto para o detector.

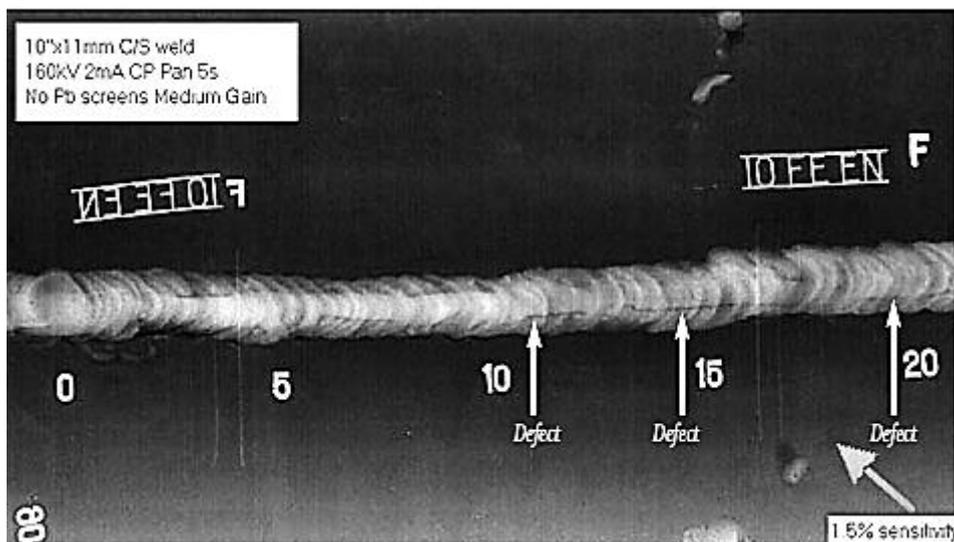
Figura 1 – Técnica de ensaio radiográfico



Fonte: Radiologia industrial – Abendi, 2009.

A imagem radiográfica é gerada através do contraste da região de maior e menor absorção dos feixes, em que o local da peça com maior espessura sofre uma maior absorção, logo, essa região na imagem apresentará tonalidade mais escura em relação à região de menor espessura. Outro exemplo ocorre quando há trinca interna em um cordão de solda, onde, a trinca terá coeficiente de absorção maior do que a material base, que forma uma tonalidade mais escura na região da falha. Na figura 02 é apresentada a imagem radiográfica que mostra o exemplo anterior.

Figura 2 – Radiografia de um cordão de solda com defeito longitudinal



Fonte: www.geinspectiontechnologies.com

Dois tipos de radiação são utilizados em radiologia industrial: raios X e raios gama. Ambas são radiações eletromagnéticas, onde, raios X são ondas com comprimento menor que 10^{-9} m emitidas das camadas eletrônicas dos átomos, e os raios gama possuem menor comprimento de onda, 10^{-11} e são gerados no núcleo do átomo.

As radiações X e gama são de natureza ondulatória e devido a isso possuem um alto poder de penetração nos materiais. Logo, grandezas relativas a uma onda eletromagnética, como: comprimento de onda, energia e frequência do feixe irão influenciar no poder de penetração do feixe.

Da física de ondas, temos que:

$$E = hf \quad \text{Eq. 1}$$

onde f é a frequência de oscilação e h é a constante de Planck.

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

ou

$$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

A velocidade de propagação de uma onda é calculada por:

$$v = \lambda f \quad \text{Eq. 2}$$

Dessa equação, podemos tirar a frequência $f = v/\lambda$ e substituir na equação da energia para encontrarmos uma nova equação para o cálculo da energia a partir do comprimento de onda.

Assim,

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq. 3}$$

Por outro lado,

$$E = eV = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq. 4}$$

onde

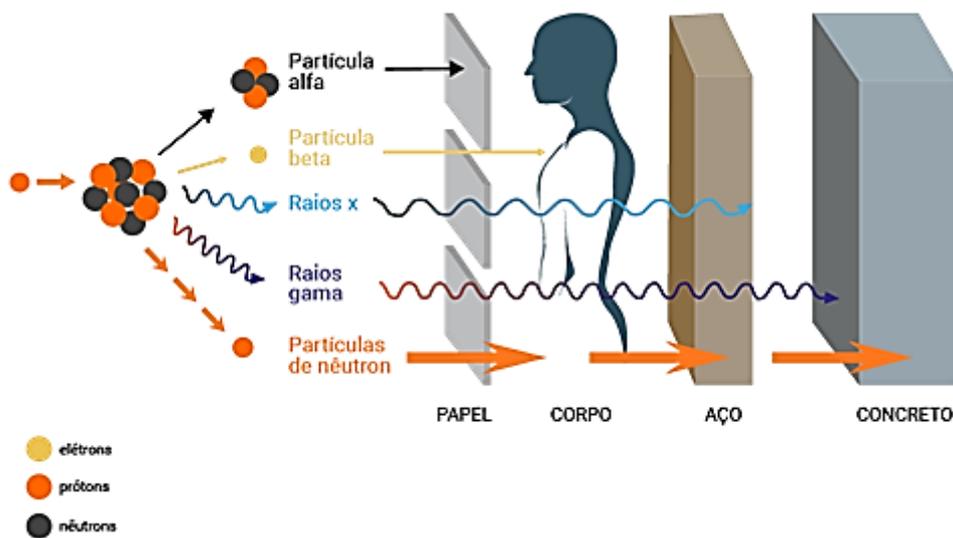
$$1eV = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

Podemos então calcular o comprimento da onda como:

$$\lambda = \frac{hc}{eV} \quad \text{Eq. 5}$$

A equação acima mostra que energia e comprimento de onda são inversamente proporcionais. Logo, demonstra que quanto menor o comprimento de onda, maior a energia de penetração do feixe de radiação emitido. A gamagrafia, por ter maior energia, é usada em materiais pesados e volumosos. Já os raios X têm energia menor, logo, só podem ser usados em testes não destrutivos de pequenas quantidades ou de materiais com número atômico baixo, mas suficientemente finos.

Figura 3 – Poder de penetração da radiação



Fonte: <https://radioprotecaonapratca.com.br>

Para compreender melhor as variáveis do processo da radiografia industrial, devemos conhecer as características relativas ao fenômeno que dá origem ao ensaio. As radiações X e gama apresentam as seguintes características: Não têm natureza corpuscular, não têm carga elétrica e viajam em linhas retas à velocidade da luz; São capazes de penetrar em materiais opacos a luz visível, podem ser absorvidas e espalhadas pelo material, mas não podem ser focalizadas; Provocam o fenômeno da fluorescência em alguns materiais; seres humanos não podem sentir radiação X ou gama.

3.1. Radiação Gama

A radiação gama é aquela emitida do núcleo do átomo em estado excitado de energia. A produção de feixes de raios gama ocorre quando o núcleo do átomo sai de um estado excitado para outro de menor energia e na desintegração de um isótopo radioativo. O estabelecimento do equilíbrio energético do núcleo do átomo é feito pela liberação de energia na forma de raios gama.

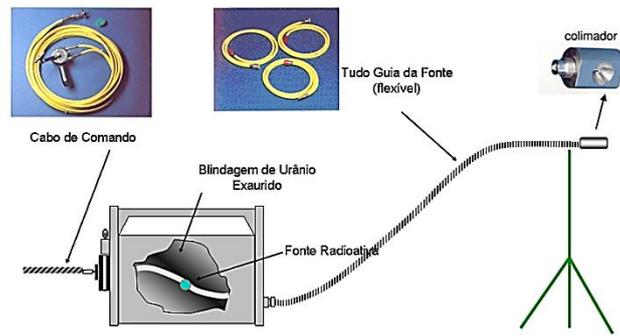
Os núcleos dos elementos radioativos se desintegram durante o decorrer do tempo e durante esse processo, um feixe de radiação com uma energia única é liberado. Cada material radioativo possui uma energia específica, mas a atividade da fonte decai com o tempo e com isso a intensidade da radiação emitida diminui. A quantidade de desintegrações que ocorre durante certo intervalo de tempo, define-se como atividade. Essa atividade pode ser calculada através da equação abaixo:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t) \quad \text{Eq. 6}$$

onde A_0 é a atividade inicial da fonte radioativa, λ é sua constante de desintegração e A é a atividade da fonte o elemento radioativo após transcorrido o intervalo de tempo t .

Com um isótopo radioativo, a atividade, ou a quantidade de radiação que é emitida pela fonte, é expressa em curies ou becquerels. Um curie é igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo e um becquerel é igual a 1 (uma) desintegração por segundo. A meia-vida de um isótopo radioativo é o tempo necessário para sua atividade ser reduzida para a metade da atividade inicial. Por exemplo, uma fonte de irídio 192 terá sua atividade reduzida pela metade a cada 74,4 dias. O decaimento é exponencial, mas a atividade da fonte nunca atinge o zero, não importa quantas meias-vidas passarem. Quanto maior a energia da radiação emitida por uma fonte radioativa, maior seu poder de penetração nos materiais. Outra característica dos isótopos radioativos é a atividade específica, que é expressa em curies por grama. A principal vantagem de uma fonte de atividade específica é a alta definição da imagem, resultante da alta atividade (curies) e pequeno tamanho físico do equipamento.

Figura 4 – Equipamento de gamagrafia



Fonte : Andreucci, Ricardo. Proteção radiológica. Abende, 2009.

Os equipamentos utilizados na radiologia por raios gama necessitam de cuidados especiais de segurança, devido à energia emitida pelo isótopo, após o acionamento do equipamento. Um destes cuidados é a blindagem de parte do equipamento, devido à emissão constante de radiação, mesmo o equipamento desligado. O equipamento utilizado para retirar a fonte de seu interior, para que a radiografia seja feita, denomina-se Irradiador.

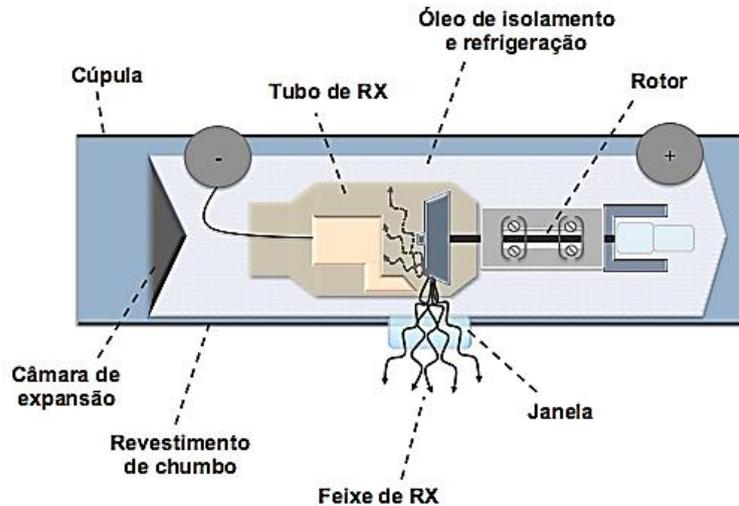
O irradiador compõe-se, basicamente, de três componentes fundamentais: uma blindagem, uma fonte radioativa e um dispositivo para expor a fonte [ANDREUCCI. Abende, 2009 B]. As blindagens são feitas, normalmente, de urânio empobrecido, que são mais densos que o chumbo e tem excelente proteção contra radiação.

Como sabemos, as fontes de radiação podem ser fornecidas com diversas atividades e cada elemento radioativo possui uma energia de radiação própria. Assim cada blindagem é dimensionada para conter um elemento radioativo específico, com certa atividade máxima determinada. Nunca se deve usar um irradiador projetado para um determinado radioisótopo, com fontes radioativas de elementos diferentes e com outras atividades. [ANDREUCCI. Abende, 2009 B].

3.2. Radiação X

Raios X são gerados quando uma partícula de alta energia cinética é rapidamente desacelerada. O método mais utilizado para produzir raios X é fazendo com que um elétron de alta energia (gerado no cátodo do tubo catódico) colida com um alvo metálico (ânodo), onde será emitindo feixes de raios X. À medida que os elétrons bombardeiam o alvo, eles podem interagem de várias formas, dentre as principais estão:

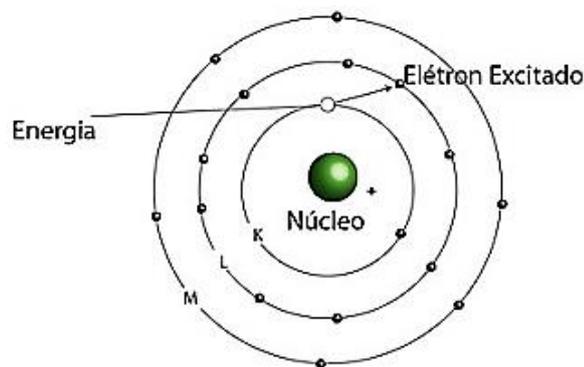
Figura 5 – Geração de raios X



Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/>

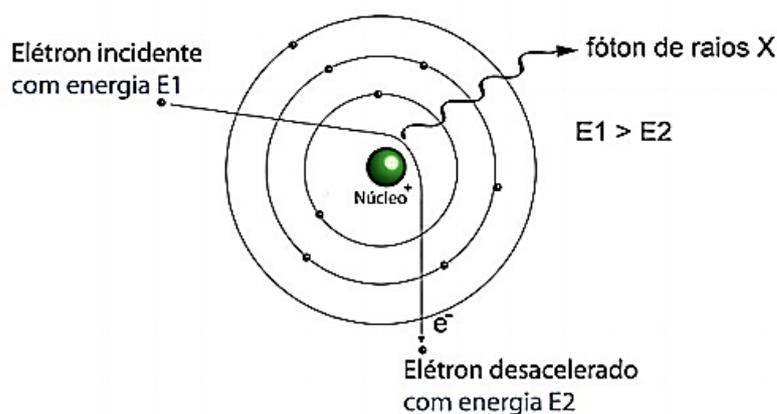
- Interação com a superfície: A energia cinética é dissipada e transformada em calor. Entre 97% a 99% da energia do choque é transformada em calor e 1% a 3% em Raios X.
- Interação da Camada K do átomo: conhecida como radiação característica ocorre quando a energia cinética do elétron é suficientemente grande para retirar um elétron da camada K de um átomo do alvo, o que gera uma vacância nesta camada. Para ocupar o espaço deixado, um elétron da camada mais externa libera energia na forma de um fóton de raios X para preencher essa vacância na camada K. A energia do fóton de raios x depende do material que compõe o alvo e não da tensão do tubo.
- Interação com núcleo do átomo: também conhecido como Bremsstahlung (do alemão “radiação de frenamento”) o elétron emitido se aproxima do núcleo e então é desviado pelo campo elétrico do mesmo, a perda de energia deste desvio é liberada como um fóton de raios X. Esse tipo de interação é responsável por 80% dos fótons no feixe de raios X, pois a energia para emissão de raios X depende da tensão do tubo.

Figura 6 – Efeito fotoelétrico



Fonte http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologiaconvencional/principio_fisicosrx/interacao-da-radiacao-ionizante-com-a-materia/efeito-fotoelettrico

Figura 7 – Radiação de *Bremsstrahlung*

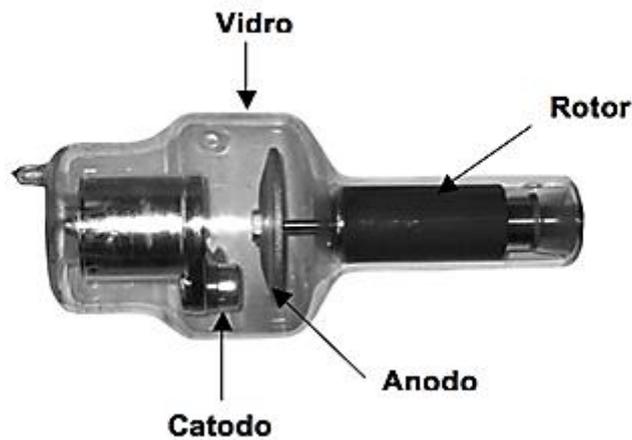


Fonte: [htt://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologiaconvencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raiosx/interacoes-no-anodo](http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologiaconvencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raiosx/interacoes-no-anodo)

A produção de raios X ocorre em uma ampola de vidro, denominada tubo de Coolidge, que por sua vez, possui duas partes distintas: o ânodo e o cátodo. O ânodo e o cátodo são submetidos a uma tensão elétrica da ordem de milhares de Volts, sendo o polo positivo ligado ao ânodo e o negativo no cátodo. O ânodo é constituído de uma pequena parte fabricada em tungstênio, também denominado de alvo, e o cátodo de um pequeno filamento por onde passa uma corrente elétrica. A emissão de elétrons ocorre quando o filamento de tungstênio (cátodo) com carga negativa é aquecido por uma corrente elétrica até a incandescência e por efeito termiônico libera elétrons com alta velocidade em

direção ao material alvo (ânodo) de carga positiva, que à medida que os elétrons bombardeiam o ânodo a desaceleração dos elétrons irá transformar a energia cinética adquirida em radiação X.

Figura 8 – Tubo de Coolidge



Fonte: HELLIER , Charles J. Handbook Of Nondestructive Evaluation, 2003

O equipamento que gera feixes de raios X é dividido em duas partes: painel de controle e cabeçote. No painel de controle estão contidos indicadores, controladores e chaves de acionamento e através desse painel ajustam-se variáveis do processo, como: corrente elétrica e tensão. O cabeçote é composto por um tubo de vidro, chamado de tubo de Coolidge, local em que ocorre a produção de raios X, e por um sistema de refrigeração que evita o superaquecimento do alvo.

A intensidade da corrente aplicada no filamento do catodo está diretamente relacionada à energia, isto é, à medida que a corrente aumenta a energia irá aumentar e conseqüentemente diminuirá o comprimento de onda, assim, aumentando poder de penetração dos feixes de raios X. A tensão será expressa em quilovolts (kV) e a corrente elétrica em miliamper (mA). O tamanho do alvo no ânodo é outra variável importante no processo, pois isso afeta a nitidez da imagem do objeto que está sendo radiografado. Isso está diretamente relacionado à definição da imagem final. Quanto menor o alvo ou a fonte de radiação, mais nítida será a imagem radiográfica resultante.

Os equipamentos considerados portáteis, com tensão até 400 kV, possuem peso em torno de 20 a 50 kg, dependendo do modelo. Os modelos de tubos refrigerados a gás são mais leves ao contrário dos refrigerados a óleo. Modernamente existem os equipamentos que operam com tensões mais baixas da ordem de 250 kV são refrigerados por meio de ventilador [Nondestructive Testing Handbook, 3ª. ed., 2002]

3.3. Proteção radiológica

Segundo as Diretrizes básicas de radioproteção estabelecidas pela norma CNEN NN 3.01, Resolução CNEN 164/14:

“Proteção radiológica ou radioproteção é o conjunto de medidas que visam a proteger o ser humano e seus descendentes contra possíveis efeitos indesejados causados pela radiação ionizante.”

De acordo com as recomendações do ICRP - *International Commission on Radiological Protection* (1977, apud Andreucci, 2016, p. 6) podemos resumir que os objetivos básicos da radioproteção são a manutenção e a conservação das condições apropriadamente seguras para as atividades envolvendo exposição humana. Três princípios fundamentais são importantes para alcançar esses objetivos e consolidar a proteção radiológica: Justificação, Otimização e Limitação de Dose.

O princípio da justificação afirma que nenhuma prática deve ser adotada a menos que sua introdução produza um benefício positivo para a sociedade;

“Nenhuma prática ou fonte associada a essa prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios, para os indivíduos expostos ou para a sociedade, suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos, assim como outros fatores pertinentes.”

Em resumo, o princípio da otimização estabelece que todas as exposições devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente possíveis. Por essa razão, esse princípio é

comumente citado como ALARA, do inglês “*As Low As Reasonably Achievable*”.

*“Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se **tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível**, tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nesse processo de otimização, deve ser observado que as doses nos indivíduos decorrentes de exposição à fonte devem estar sujeitas às restrições de dose relacionadas a essa fonte. No caso de exposições médicas de pacientes, a otimização médica da proteção radiológica deve ser entendida como a aplicação da dose de radiação necessária e suficiente para atingir os propósitos a que se destina.”*

O princípio da limitação de doses individuais preconiza os valores de dose efetiva ou de dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, para indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público, decorrentes de práticas autorizadas, cujas magnitudes não devem ser excedidas.

A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na tabela a seguir, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.

Tabela 1 – Limites Primários Anuais de Doses

Limites de dose anuais			
Grandeza	Órgão	Indivíduos ocupacionalmente expostos ¹	Indivíduos do público ²
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

Fonte Norma CNEN NN 3.01, Resolução CNEN 164/14.

Em proteção radiológica é conveniente utilizar uma grandeza que relacione melhor a dose com os efeitos deletérios da radiação sobre o ser humano. Esta quantidade é denominada de dose equivalente “H”, que é a dose absorvida modificada pelos fatores de ponderação “Q” que pode variar de 1 a 20, e é denominado fator de qualidade. Para raios X e gama Q é igual à unidade. “N” são outros fatores modificadores especificados por normas internacionais, e que na atualidade é assumido como unitário. No sistema atual, a unidade de dose equivalente é o Sievert (Sv) = 1 Joule/kg.

$$H = D \times Q \times N$$

Na rotina diária em proteção radiológica, usa-se com frequência submúltiplos do Sievert, tais como:

$$1 \text{ mSv} = 100 \text{ mRem} \quad 1 \text{ nSv} = 0,1 \text{ } \mu\text{Rem}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Sv} = 0,1 \text{ mRem}$$

$$1 \text{ Sv} \text{ ----> } 25,8 \text{ mC/kg}$$

$$1 \text{ mSv} \text{ ---> } 25,8 \text{ } \mu\text{C/kg, Para Raios X e Gama}$$

3.4. Controle das Radiações Ionizantes

¹ Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

² Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

³ Nas unidades antigas a dose equivalente era medida em Rem e valia: 1 Rem* = 100 ergs/g ou seja 1 Sv = 100 Rem . Doses acima de 1 Sv deve-se usar o Gray como unidade de dose.

As principais medidas de atenuação e controle da radiação são tempo, distância e blindagem (ou barreira) que serão discutidas a seguir.

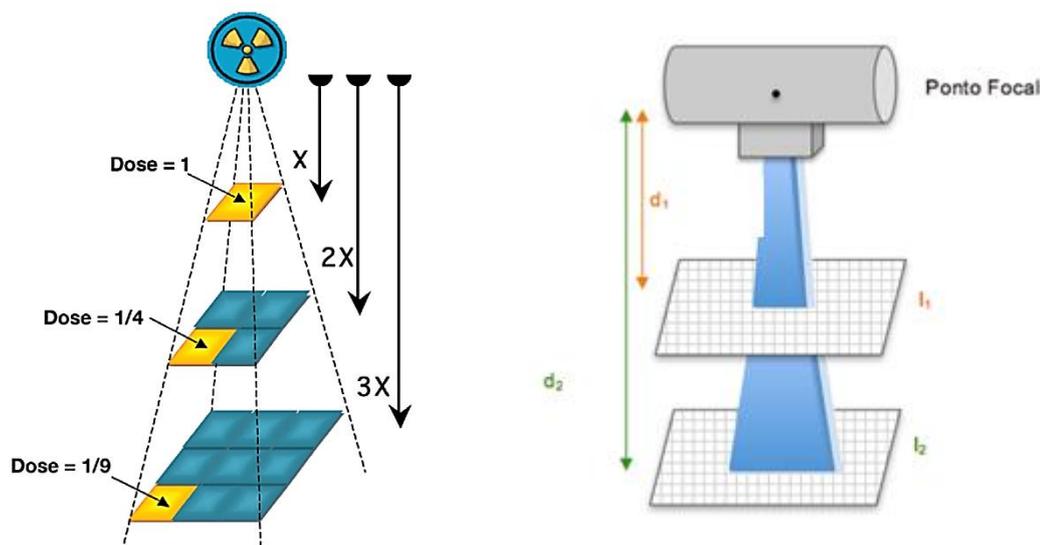
3.4.1. Distância

A distância é a forma de prevenção contra as radiações ionizantes mais práticas, baixas custo e rápido numa situação normal ou de emergência. A intensidade da radiação é inversamente relacionada ao quadrado da distância (lei do inverso do quadrado). Portanto, dobrando a distância, a dose de radiação é reduzida em quatro vezes. Cabe lembrar que essa relação somente é verdadeira para uma fonte puntiforme, um detector puntiforme e absorção desprezível entre a fonte e o detector. Isto porque ela se baseia no ângulo sólido definido pela fonte (puntiforme) e a superfície de uma calota esférica definida pela *distância*₂ (ver figura 9), entre fonte e objeto alvo, durante o tempo *t* de exposição [ANDREUCCI. Abende, 2009]. A lei do inverso do quadrado é dada por:

$$\frac{(\text{distância}_1)^2}{(\text{distância}_2)^2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\text{dose}_2}{\text{dose}_1} \quad \text{Eq. 7}$$

onde *I*₁ e *I*₂ são as intensidades da radiação nas distâncias 1 e 2, respectivamente.

Figura 9 – Fator de redução da exposição



Fonte: <https://www.semanticscholar.org>

3.4.2. Blindagem

Blindagem é definida como todo sistema destinado a atenuar um campo de radiação por interposição de um meio material entre a fonte de radiação e as pessoas ou objetos a proteger. Logo, a blindagem é considerada o método mais importante de proteção contra a radiação ionizante. [CNEN, 2006].

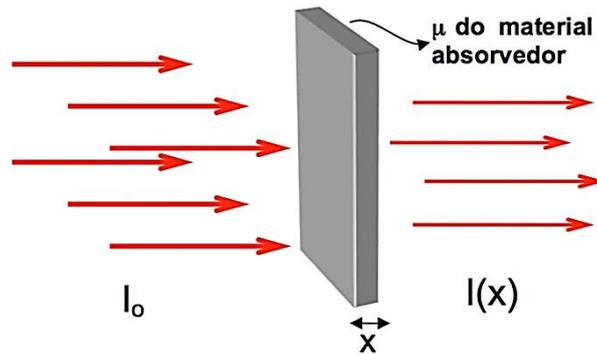
A proteção com blindagem irá ser utilizada quando houver exposição a níveis elevados de radiação ou operação intensas das fontes. A escolha do material de blindagem depende do tipo de radiação, atividade da fonte e da taxa de dose. O cálculo e construção de uma blindagem para uma instalação devem levar em consideração a localização dos geradores de radiação, as direções possíveis de incidência do feixe, o tempo de ocupação da máquina ou fonte, a carga de trabalho, os locais e áreas circunvizinhas, a planta da instalação. [Tauhata, IRD/CNEN, 2013]

A atenuação da radiação pelo material da blindagem é determinada pela energia, pela natureza do material absorvedor e a sua espessura. Pode-se então determinar a espessura de material necessário para se atenuar feixes de fótons X e gama, utilizando em primeira aproximação, a lei de atenuação exponencial abaixo.

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad \text{Eq. 8}$$

onde I_0 é a intensidade da radiação incidente, I é a intensidade transmitida através de um material de espessura x e coeficiente de atenuação μ .

Figura 10 – Atenuação da radiação



Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologiaconvencional/principios-fisicosrx/atenuacao-de-raios-x>

3.4.3. Tempo exposição

A dose acumulada por uma pessoa que trabalha numa área exposta a uma determinada taxa de dose é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece na área. [Tauhata, IRD/CNEN,2013]. Essa dose pode ser controlada pela limitação desse tempo:

$$\text{Dose} = \text{taxa} \times \text{tempo}$$

A redução do tempo de exposição à radiação é uma das principais formas de diminuição dos efeitos da radiação, ou seja, quanto menor o tempo em áreas expostas menor será a dose absorvida pelo indivíduo, já que é acumulativa.

3.4.4. Classificação das áreas de trabalho

Para fins de gerenciamento da Proteção Radiológica numa instalação, as áreas de trabalho com material radioativo ou geradores de radiação, devem ser classificadas em: Área Controlada, Área Supervisionada e Área [Norma CNEN-NN-3.01]

a) Área proibida

Região onde se localiza o equipamento de raio X e existe as maiores intensidades de radiação. O acesso de pessoas é proibido durante a operação e execução do ensaio radiográfico.

b) Área Controlada

Região em torno da fonte de radiação onde os indivíduos podem receber uma dose equivalente entre a dose limite de 20 mSv/ano (tabela 1) e 30% desta mesma dose limite, ou seja, 6 mSv/ano.

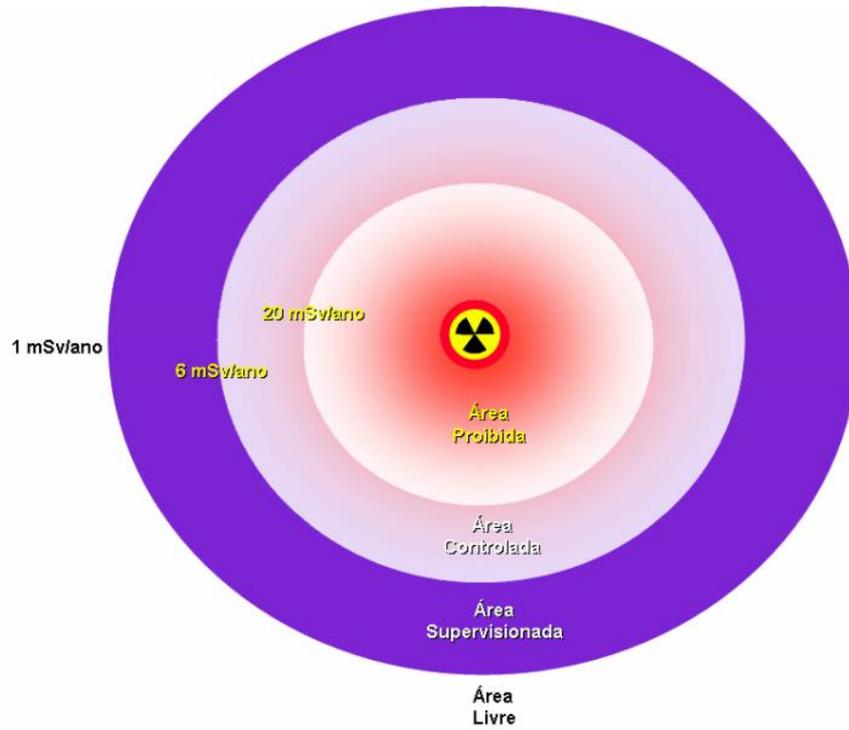
c) Área Supervisionada

Área em que a dose equivalente, para indivíduos, pode estar entre 30% da dose limite de 20 mSv/ano (tabela 1) , 6 mSv/ano, e a dose para o público, 1 mSv/ano (tabela

d) Área Livre

As áreas consideradas livres devem apresentar um nível de exposição menor do que 1 mSv/ano.

Figura 11 – Classificação da área de trabalho



Fonte :Classificação de Áreas conforme Resolução CNEN Nr 164/2011 (NN-3.01:2011) Posição Regulatória Nr. 119/2011 (PR-3.01/004:2011)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Equipamento gerador de raios X

O equipamento de raios X (ver Figura 8) utilizado para as análises é da marca YXLON e tem capacidade de tensão máxima até 320kv (ver Tabela 1) suficiente para penetração de até 115 de espessura em aços carbono.

Figura 12 – Equipamento Gerador de Raios X de fabricação YXLON



Fonte: www.yxlon.com

Tabela 2 – Descrição do gerador de raios X

EQUIPAMENTO GERADOR DE RAIOS X	
Fabricante	YXLON
Modelo	MG325
Tensão	15 a 320 kV
Corrente	0 a 22.5 mA
Dimensões	375 mm x 335 mm x 625 mm
Peso	80 kg

Fonte: Próprio autor

Com auxílio da Equação 5, apresentada no capítulo 3, e reapresentada abaixo,

$$\lambda = \frac{hc}{eV} \quad \text{Eq. 5}$$

quando utilizado na tensão máxima (320 kV) o equipamento produzirá uma radiação com comprimento de onda igual a $3,90234375 \times 10^{-12}$ metros. Consequentemente, a energia do fóton nessa situação é 0.318 MeV.

De acordo com a Norma CNEN NN 6.02, que dispõe sobre o licenciamento de instalações radiativas, as instalações radiativas que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante estão classificadas no GRUPO 7. Este é dividido nos seguintes subgrupos:

I - SUBGRUPO 7A - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzam feixe com energia menor ou igual a 0,10 MeV;

II - SUBGRUPO 7B - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,10 MeV e menor ou igual a 0,60 MeV;

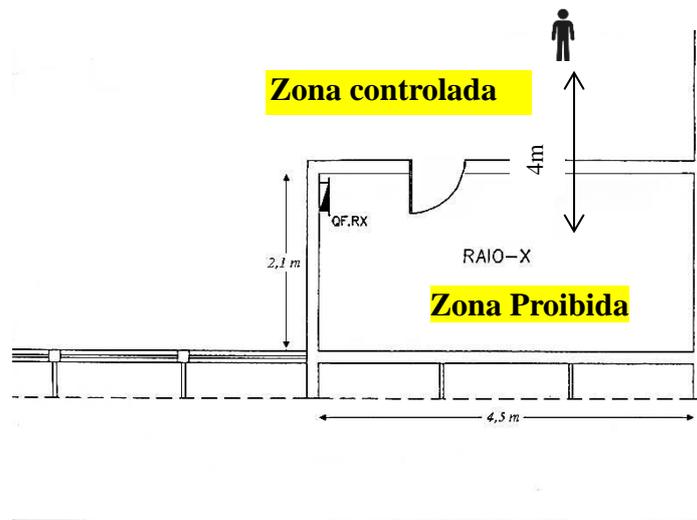
III - SUBGRUPO 7C - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,60 MeV e menor ou igual a 50 MeV;

IV - SUBGRUPO 7D - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 50 MeV.

Portanto, o equipamento localizado no Centro de Ensaios Não Destrutivos (CENDE) e considerando nesse trabalho (figura 12) pertence ao SUBGRUPO 7B.

O aparelho encontra-se instalado no interior de uma sala (*bunker*) de 9.45 m² (ver Figura 9), cujas paredes são revestidas de barita, é controlado a uma distância de pelo menos 4 m. Além disso, a emissão de feixes de raios X será na direção oposta ao local de operação do aparelho. Na época da instalação do equipamento gerador de raios X, realizada pelo técnico autorizado pelo fabricante do aparelho, verificou-se que as paredes revestidas com barita do *bunker* foram suficientes para blindar a radiação produzida com uma diferença de potencial de até 100 kV. Para tensões mais elevadas foi detectada alguma radiação na área controlada, o que motivou a construção do castelo de chumbo.

Figura 13 – Planta baixa do bunker



Fonte: Centro de ensaios não destrutivos - Cende

No presente estudo, será apresentado um projeto de um castelo de chumbo como método de blindagem complementar a proteção promovida pelas paredes revestidas com barita do *bunker* que abriga o equipamento gerador de raios X, local em que serão realizados os ensaios radiográficos. O equipamento gerador de raios X encontra-se instalado e será utilizado dentro do castelo de chumbo cujas paredes são construídas por 80 tijolos e 32 placas de chumbo são utilizadas na base e da parte superior do mesmo. Os tijolos e placas foram dimensionados para gerar uma estrutura estável e que atenuasse de forma eficaz a radiação emitida.

4.2. Moldes para fundição

Os tijolos e as placas utilizados na construção do castelo de chumbo foram fabricados no laboratório de fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC. Durante o processo o chumbo é aquecido a uma temperatura elevada o suficiente para levá-lo ao estado líquido, e então é vazado em um molde metálico ou de areia. Após a solidificação o chumbo adquire a forma e dimensões definidas pela cavidade do molde. Uma vez resfriado o suficiente a peça produzida é removida do molde. O molde metálico utilizado nesse trabalho para produção do tijolo base é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Matriz de fundição para produção do tijolo base.



Fonte: própria do autor

A dificuldade em produzir uma forma metálica a ser utilizada na produção de peças mais complexas levou a escolha de fundição em molde de areia para a fabricação dos tijolos de base das arestas do castelo. Fundição em molde de areia é o processo mais utilizado e consiste na fusão e vazamento do metal fundido dentro de uma cavidade moldada em areia com o auxílio de um modelo instalado em uma caixa de moldar. Moldes de areia podem ser classificados em permanentes ou perecíveis. Neste trabalho foram utilizados moldes de areia perecíveis que foram destruídos após a solidificação para retirada das peças. O modelo/macho utilizado para produção do tijolo das arestas do castelo é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Molde em fibra de vidro utilizado para fabricação do molde em areia



Fonte: própria do autor

Vale destacar que os dois tipos de moldes dos tijolos do castelo apresenta um detalhe em “V” para promover um melhor encaixe dos tijolos e assegurar estabilidade à estrutura, bem como evitar a fuga de radiação uma vez que elas viajam em linha reta.

Na fabricação das chapas foi utilizado um molde metálico aberto onde o metal fundido foi cuidadosamente vazado em seu centro. Após a solidificação e suficientemente resfriamento as peças são retiradas do molde. O molde metálico utilizado para produção das chapas de chumbo é apresentado na Figura 16.

Figura 15 – Molde para produção das Chapas de chumbo.



Fonte: própria do autor

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Dimensionamento da blindagem

Os cálculos iniciais para dimensionamento do castelo de chumbo foram realizados com base na lei de atenuação exponencial (Eq. 8), na lei do inverso do quadrado e para uma tensão máxima de 0,25MV. Segundo a tabela 3 (Nondestructive Testing Handbook, 2002), para essa tensão a intensidade dos raios X é de $0.2 \text{ kSv.min}^{-1}.\text{mA}^{-1}$, a 1m de distância da fonte. Considerando uma corrente de 5mA, teremos uma dose de 1.0 kSv.min^{-1} . A Tabela 4, que apresenta os coeficientes de atenuação do chumbo para raios X de diferentes energias, não fornece o coeficiente de atenuação para raios X de com energia de 0,25MeV. Para contornar esse problema foi utilizado o valor de $4,29 \text{ cm}^{-1}$ correspondente ao coeficiente de atenuação para radiação X com energia máxima 0,3MeV. É importante chamar a atenção ao fato de que os materiais apresentam menores coeficientes de atenuação para radiação de maior energia. Na prática isso implica em um dimensionamento com maior nível de segurança.

Tabela 3 – Intensidade de raios X

INTENSIDADE DE RAIOS X A PARTIR DO ALVO IDEAL		
Pico de tensão (MV)	Intensidade a 1 metro	
	kSv.min-1.mA-1	(R.min-1.mA-1)
0.05	0.05	(0.05)
0.07	0.01	(0.1)
0.1	0.04	(0.4)
0.25	0.2	(2)
1.000	2.0	(20)
2.000	28	(280)
5.000	500	(5000)
10.000	3000	(300 00)
15.000	10000	(100 000)
20.000	20000	(200 000)

Fonte: Nondestructive Testing Handbook, 2002.

Tabela 4 – Coeficiente de atenuação para o Chumbo (Z = 82)

Energia (MeV)	Coeficiente de atenuação		
	Atômico (10^{-28}m^2)	Massa † (cm^2g^{-1})	Linear * (cm^{-1})
0.1	1880	5.47	62
0.15	660	1.92	21.8
0.2	324	0.942	10.7
0.3	130	0.378	4.29
0.4	75.8	0.22	2.49
0.5	52.4	0.152	1.72
0.6	41.1	0.12	1.36
0.8	29.8	0.0867	0.983
1	24.2	0.0704	0.798

Fonte: Nondestructive Testing Handbook, 2002

Utilizando a equação 7 para determinar a intensidade de radiação a 4 m, teremos:

$$\frac{(\text{distância}_1)^2}{(\text{distância})^2} = \frac{I_2}{I_1} \rightarrow \frac{(1\text{m})^2}{(4\text{m})^2} = \frac{I_2}{1 \text{ kSv.min}^{-1}}$$

$$I_2 = 0.0625 \text{ kSv.min}^{-1} \text{ ou } 6.25 \cdot 10^4 \text{ mSv.min}^{-1}$$

Supondo que o aparelho funcione todos os dias uteis do ano, a dose admissível por semana será:

$$\text{Limite da dose: } \frac{20\text{mSv}}{50\text{semanas}} = 0.4\text{mSv}$$

O tempo de trabalho exposto à radiação será:

$$\text{Tempo de trabalho} = \frac{\text{dose admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} =$$

$$\frac{0.4 \text{ mSv.wk}^{-1}}{6.25 \times 10^8 \text{ mSv.min}^{-1}} = 6.4 \times 10^{-10} \text{ min.wk}^{-1}$$

O aparelho funcionando 8 horas por dia durante 5 dias = 2400min.wk⁻¹

$$2400 = \frac{\text{dose Admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} = \frac{0.4 \text{ mSv.wk}^{-1}}{2400 \text{ min.wk}^{-1}} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ min.wk}^{-1}$$

Usando a equação para atenuação para determinação da espessura do tijolo de chumbo, teremos:

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

$$I = 1,6 \times 10^{-4} \text{ mSv.semana}^{-1}$$

$$I_0 = 6.25 \times 10^4 \text{ mSv.min}^{-1}$$

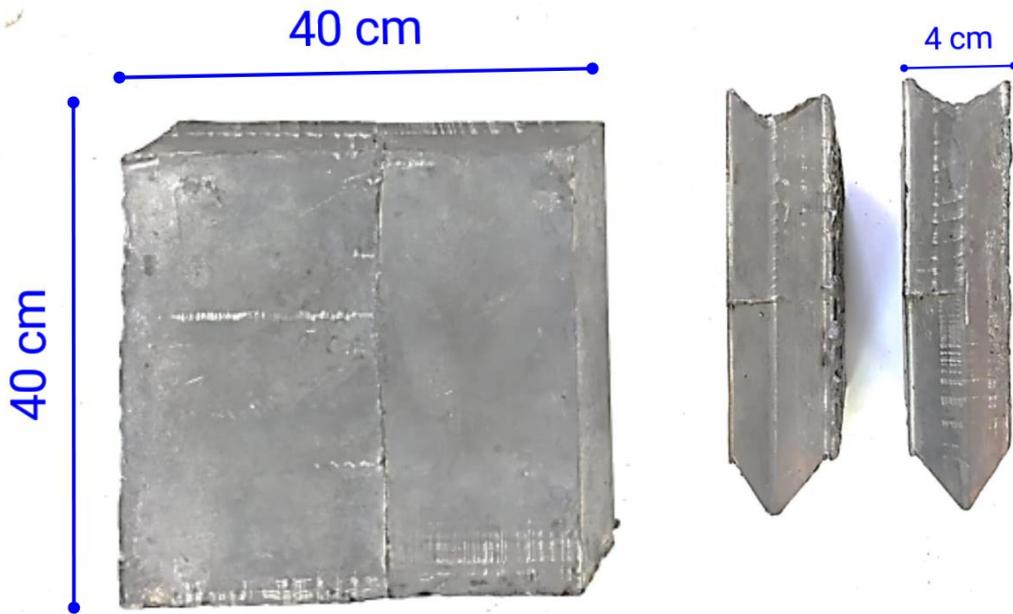
$$\mu = 4.29$$

Temos **X = 4.6 cm** de espessura para a parede

5.2. Produtos de fundição

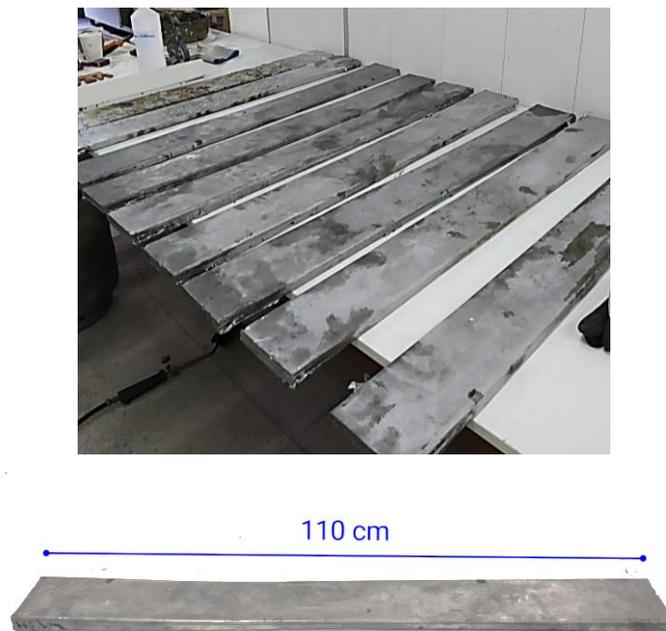
Os elementos (tijolos e chapas) produzidos por fundição e utilizados na montagem do castelo de chumbo consumiram aproximadamente três toneladas de sucata de chumbo e são apresentados a seguir.

Figura 16 – Tijolos base produzidos por fundição em molde metálico.



Fonte: própria do autor

Figura 17 – Chapas de chumbo produzido por fundição em molde metálico.

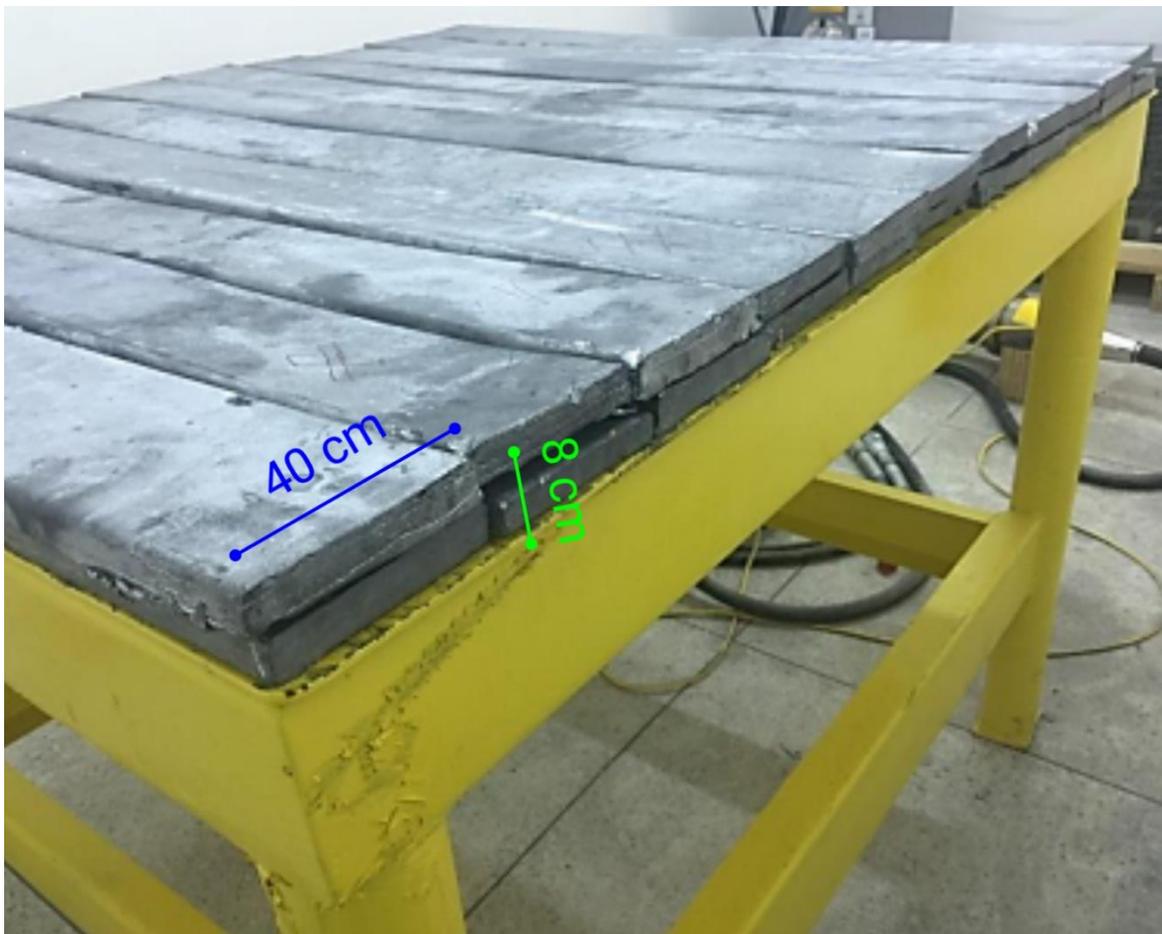


Fonte: própria do autor

Montagem do Castelo de Chumbo

O castelo de chumbo foi montado a partir de 78 tijolos encaixáveis de modelo base, 12 tijolos modelo base canto e 32 chapas. Esses elementos consumiram, aproximadamente, três toneladas de sucata de chumbo. Os tijolos foram projetados com um detalhe em “V” tal que melhoram o encaixe e evitem a fuga de radiação. A sequência da montagem da blindagem está relatada nas figuras a seguir:

Figura 18 – 1ª etapa: Instalação das chapas do fundo do castelo de chumbo.



Fonte: própria do autor

Figura 18 – 2ª etapa: Montagem da primeira fileira de tijolos do castelo de chumbo.



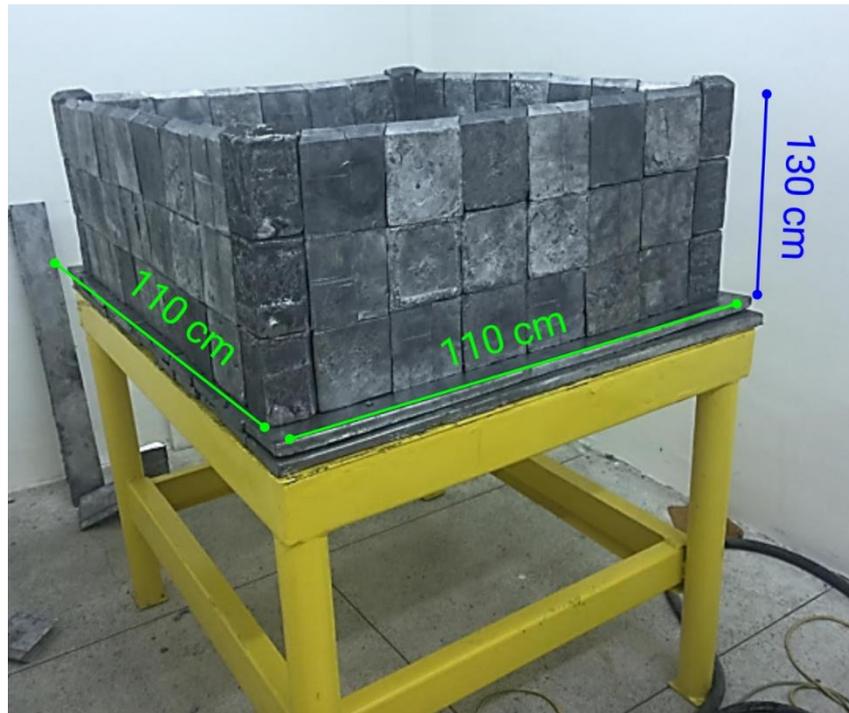
Fonte: própria do autor

Figura 19 – 3ª etapa: Montagem da segunda fileira de tijolos do castelo de chumbo.



Fonte: própria do autor

Figura 20 – 4ª etapa: Montagem da terceira fileira de tijolos do castelo de chumbo.



Fonte: própria do autor

Figura 21 – Castelo de chumbo



Fonte: própria do autor

5.3. Cálculo de doses e tempo de trabalho

De acordo com a tabela 3, que apresenta a intensidade dos raios X em função da diferença de potencial aplicada ao equipamento gerador de raios X, a intensidade da radiação produzida com 0.10 MV (100 kV) é de $0.04 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mA}^{-1}$ a 1 metro da fonte. Assim, para uma corrente de 10 mA teremos uma radiação com intensidade de $0.4 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}$ ($= 0.04 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mA}^{-1} \times 10 \text{ mA}$).

De acordo com a tabela 4, o coeficiente de atenuação linear, μ , para raios X com energia de 100 keV, é igual a 62 cm^{-1} . Ao atravessar uma barreira de chumbo com 4 cm de espessura, a intensidade da radiação será reduzida a $5.6 \times 10^{-55} \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}$ a 1 metro (equivalente a $5.6 \times 10^{-49} \text{ mSv}\cdot\text{min}^{-1}$).

Segundo a Norma CNEN NN 3.01, o limite de dose anual para indivíduos ocupacionalmente expostos é de $20 \text{ mSv}/\text{ano}$, o que equivale a $0.4 \text{ mSv}\cdot\text{wk}^{-1}$. Em termos práticos, o tempo de trabalho é calculado dividindo a dose admissível semanal pela taxa de exposição. O tempo de trabalho calculado para o caso discutido acima é apresentado a seguir e revela ser muito superior ao disponível em uma semana.

$$\text{tempo de trabalho} = \frac{\text{dose admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} = \frac{0.4 \text{ mSv}\cdot\text{wk}^{-1}}{5.6 \times 10^{-49} \text{ mSv}\cdot\text{min}^{-1}} = 7.1 \times 10^{47} \text{ min}\cdot\text{wk}^{-1}$$

Ainda de acordo com a tabela 3, quando a diferença de potencial é elevada para 0.25 MV (250 kV) a intensidade da radiação a 1 metro da fonte é $0.2 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mA}^{-1}$. Considerando uma corrente de 5 mA teremos uma taxa e exposição igual a $1.0 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}$ ($= 0.2 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mA}^{-1} \times 5 \text{ mA}$).

A tabela 4 não fornece o valor do coeficiente de atenuação linear para raios X com energia de 250 keV. Faremos então duas análises: em uma delas utilizaremos um coeficiente de atenuação linear para radiação com energia de 200 kV (menor que 250 keV), na outra utilizaremos um coeficiente de atenuação linear para radiação com energia de 300 kV (maior que 250 keV).

Primeiramente, de acordo com a tabela 4, o coeficiente de atenuação linear, μ , do chumbo para raios X com energia de 200 keV é 10.7 cm^{-1} . Pela tabela 3 temos que energia de raios X produzidos com 250kV tem intensidade de $0.2 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mA}^{-1}$. Assim, para uma corrente de 5 mA a radiação incide com intensidade de $1.0 \text{ kSv}\cdot\text{min}^{-1}$ e uma

barreira de chumbo com 2 cm de espessura a reduzirá para 5.0×10^{-10} kSv.min⁻¹ a 1 metro (equivalente a 5.0×10^{-4} mSv.min⁻¹). Convertendo o limite de dose anual, estabelecido na norma CNEN NN 3.01, para um equivalente semanal e dividindo-o por essa nova taxa de exposição chegamos ao tempo de trabalho de 786 minutos por semana.

$$\text{tempo de trabalho} = \frac{\text{dose admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} = \frac{0.4 \text{ mSv.wk}^{-1}}{5.0 \times 10^{-4} \text{ mSv.min}^{-1}} = 786 \text{ min.wk}^{-1}$$

A seguir utilizaremos o coeficiente de atenuação linear para raios X com energia de 300 keV ($\mu = 4.29 \text{ cm}^{-1}$). O uso de um menor coeficiente de atenuação linear exige uma blindagem maior. É importante informar que a espessura real dos tijolos utilizados na construção do castelo de chumbo é 4.0 cm. Assim, de acordo com a Equação 8, a intensidade da radiação será reduzida para 3.53×10^{-8} kSv.min⁻¹ a 1 metro da fonte (equivalente a $0.0353 \text{ mSv.min}^{-1}$).

Levando novamente em consideração o limite de dose anual de 20 mSv.ano^{-1} (equivalente a 0.4 mSv.wk^{-1}) estabelecido pela norma CNEN NN 3.01 para indivíduos ocupacionalmente expostos, o tempo de trabalho calculado para esse segundo caso é apresentado a seguir e se revela ser muito pouco por semana.

$$\text{tempo de trabalho} = \frac{\text{dose admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} = \frac{0.4 \text{ mSv.wk}^{-1}}{0.0353 \text{ mSv.min}^{-1}} = 11 \text{ min.wk}^{-1}$$

No entanto, devemos considerar que todos os cálculos acima foram realizados para uma fonte direcionada para o indivíduo ocupacionalmente exposto (operador do aparelho) localizado a um metro de distância da mesma. Na realidade, a distância entre a fonte e a mesa de controle é superior a quatro metros. Corrigindo a distância para 4 metros teremos uma taxa de exposição de 2.2×10^{-9} kSv.min⁻¹ (equivalente a $0.0022 \text{ mSv.min}^{-1}$) e o tempo de trabalho aumenta para 180 minutos por semana, aproximadamente.

$$\text{tempo de trabalho} = \frac{\text{dose admissível por semana}}{\text{taxa de exposição}} = \frac{0.4 \text{ mSv.wk}^{-1}}{0.0022 \text{ mSv.min}^{-1}} = 181 \text{ min.wk}^{-1}$$

Por fim, além da correção na distância, devemos considerar que a fonte está

instalada com o feixe direcionado no sentido oposto a posição do operador, e que as paredes do *bunker* são revestidas com barita como mencionado anteriormente, o que aumenta a segurança na área controlada.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal construir um castelo de chumbo capaz de atenuar os efeitos da radiação em uma área controlada. Todas as etapas desde o planejamento, fabricação dos elementos estruturais, montagem do castelo e cálculos de tempo de trabalho para diferentes taxas de exposição foram apresentados.

Através dos cálculos apresentados na seção 5.3, foi possível concluir que o castelo de chumbo está dimensionado para garantir que, para radiação com energia de 0.1 MeV, tanto indivíduos ocupacionalmente expostos quanto indivíduos do público poderão permanecer na área controlada por tempo indeterminado. Mesmo para esses, cujo limite de dose anual é mais rigoroso e não deve ser superior a 1 mSv/ano, o tempo de exposição é maior que 3.5×10^{46} minutos por semana, ou seja, maior que o tempo disponível.

Foi apresentado que para indivíduos ocupacionalmente expostos o tempo de exposição de 786 minutos por semana suficiente para atender aos requisitos de segurança, ou seja, foi constatado que para uma energia de 200 keV o indivíduo estará exposto a uma radiação com 1.0 kSv.min^{-1} que ao incidir em uma barreira de chumbo, terá sua intensidade reduzida a $5.0 \times 10^{-10} \text{ kSv.min}^{-1}$ a 1 metro (equivalente a $5.0 \times 10^{-4} \text{ mSv.min}^{-1}$), logo,. Quando o gerador de raios X operar com uma tensão de 300kV o tempo de exposição diminuirá para 11 minutos por semana, menor em relação ao calculado para a tensão anterior, mas corrigindo a distância de exposição do operador para 4 metros, o tempo de exposição aumenta para 180 minutos semanais.

Por fim, os resultados obtidos mostraram que o castelo de chumbo se mostrou com dimensionamento superestimado, e ainda, considerando a correção na distância, a emissão feixes em sentido oposto a posição do operador, e que as paredes do *bunker* são revestidas com barita conclui-se que o castelo de chumbo é ideal para a proteção de indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público contra radiação.

Em pesquisas futuras, pretendemos propor a medição da intensidade da energia emitida pelo gerador de raios X para diferentes níveis de tensões, dimensões e materiais.

7. REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, Ricardo. Radiologia Industrial. Abende, 2009.

ANDREUCCI, Ricardo. Proteção Radiológica. Abende, 2009.

Nondestructive Testing Handbook, Volume 4 - Radiographic Testing, 3ª. ed., 2002

International Atomic Energy Agency (IAEA) Noções de Proteção Radiológica

HELLIER , Charles J. Handbook Of Nondestructive Evaluation, 2003.

Norma CNEN NN 3.01, Resolução CNEN 164/14, Diretrizes básicas de proteção radiológica.

Norma CNEN NN 6.02, Licenciamento de Instalações Radiativas (Resolução CNEN 166/14)

http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Tahuata_Fundamentos.pdf
