INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**PROJETO DE UM LABORATÓRIO INTEGRADO
DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS NO IPEN**

Gustavo Adolfo San José Barros

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do
grau de Mestre em Ciências na área
de Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

**Orientadora:
Dra. Linda V. E. Caldas**

São Paulo

2009

*“Para os nossos pais que pelo amor
nos proporcionaram a vida”*

Para a praia da Fortaleza, em Ubatuba; quando a conheci me vieram à tona muitos sonhos esquecidos e seria impossível que continuassem adormecidos.

Aos meus pais, por todo o apoio e todo o conhecimento de vida que me repassaram.

Para meus filhos amados, Beatriz e Eduardo, razão da minha existência.

Para minha amada Valéria Sanchez, incansável incentivadora, que como um facho de luz me ajudou a iluminar e seguir este caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me conduzir por este caminho

À Dra. Linda V. E. Caldas, pela maneira gentil e delicada em todos os momentos em minha orientação e também pelo incansável incentivo e motivação nos momentos mais árdos e difíceis.

À amiga Dra. Sueli Borrelly, pelo incentivo para iniciar o programa de Pós-Graduação.

Ao amigo Jean Yves Schoumacher, da Empresa JYSTUDIO, pela confecção das plantas e imagens tridimensionais.

À equipe de Radioproteção do IPEN, aos supervisores Dra. Malvina B. Mitake, M.Sc. Fábio Suzuki e aos técnicos Sr. Massao Kamonseki e Sr. José Carlos Barbosa da Silva, pelo apoio nos cálculos de blindagens dos laboratórios e nos levantamentos radiométricos.

Ao Dr. Victor e à Dra. Maria da Penha A. Potiens, pelas valiosas informações sobre o Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN.

À Donata Celicéia de O. Zanin, que com muita gentileza me ajudou na formatação e impressão deste trabalho.

À equipe da Prefeitura do IPEN, pela ajuda nas plantas das construções do Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN e também pelo fornecimento dos funcionários para a execução dos furos necessários para o levantamento radiométrico no terreno acima do Bunker.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

*“ Nós nos transformamos naquilo que praticamos
com frequência. A perfeição, portanto, não é um ato
isolado , é um hábito “*

Aristóteles

PROJETO DE UM LABORATÓRIO INTEGRADO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS NO IPEN

Gustavo Adolfo San José Barros

RESUMO

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares oferece serviços de calibração de detectores de radiação utilizados em radioproteção, radiodiagnóstico e radioterapia, para o IPEN e também para instalações externas, públicas e particulares. Uma parte de suas instalações estão localizadas no prédio principal, junto com outros laboratórios e salas de estudo, e uma outra parte num prédio isolado, semi-enterrado (Bunker). Para a otimização, a modernização e principalmente a segurança, os laboratórios situados no prédio principal precisam ser transferidos para um local isolado. Neste trabalho foi desenvolvido um projeto de um laboratório integrado, que será uma expansão do atual Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN. Para isto, foram feitos levantamentos radiométricos no local escolhido e levantadas todas as necessidades da equipe quanto a espaço e disposição das salas. No projeto, os laboratórios com equipamentos de radiação X, e fontes radioativas alfa e beta ficaram isolados numa parte do prédio, e as blindagens das paredes foram determinadas, dependendo do uso de cada laboratório.

PROJECT OF AN INTEGRATED CALIBRATION LABORATORY OF INSTRUMENTS AT IPEN

Gustavo Adolfo San José Barros

ABSTRACT

The Calibration Laboratory of Instruments of Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares offers calibration services of radiation detectors used in radioprotection, diagnostic radiology and radiotherapy, for IPEN and for external facilities (public and private). One part of its facilities is located in the main building, along with other laboratories and study rooms, and another part in an isolated building called Bunker. For the optimization, modernization and specially the safety, the laboratories in the main building shall be transferred to an isolated place. In this work, a project of an integrated laboratory for calibration of instruments was developed, and it will be an expansion of the current Calibration Laboratory of Instruments of IPEN. Therefore, a series of radiometric monitorings of the chosen localization of the future laboratory was realized, and all staff needs (dimensions and disposition of the study rooms and laboratories) were defined. In this project, the laboratories with X ray equipment, alpha and beta radiation sources were located at an isolated part of the building, and the wall shielding was determined, depending on the use of each laboratory.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	05
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	06
3.1 Princípios gerais de radioproteção	06
3.2 Principais grandezas e unidades da radioproteção	07
3.2.1 Atividade (A)	07
3.2.2 Exposição (X)	07
3.2.3 Dose absorvida (D)	08
3.2.4 Kerma (K)	08
3.2.5 Dose equivalente (H)	09
3.3 Radioproteção I	09
3.4 Interação da radiação X e gama com a matéria	11
3.5 Proteção contra radiações ionizantes	13
3.5.1 Limitação do tempo de exposição	13
3.5.2 Distância da fonte de radiação	14
3.5.3 Blindagem da fonte de radiação	14
3.5.4 Camada semi-redutora	14
3.6 Metrologia das radiações	15
3.6.1 Detectores de radiação	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 Equipamentos de raios X	18
4.1.2 Sistemas de radiação alfa e beta	19
4.2 Parâmetros de utilização dos equipamentos de raios X	19
4.3 Equipamentos utilizados para as medições nos levantamentos radiométricos	20
5. RESULTADOS	22
5.1. Levantamentos radiométricos	26
5.2. Sala de controle e laboratórios.	31
5.3. Projeto final	37
5.4. Sobrecarga no Bunker.	38

5.5. Limites anuais de exposição	39
5.6. Segurança em termos de radioproteção	39
5.7. Determinação das blindagens dos laboratórios	39
5.8 –Metodologia para o cálculo de blindagens do NCRP 49	43
5.8.1 -Cálculo das barreiras primárias - Paredes P-03, P-04 e P-11	44
5.8.2 -Cálculo das barreiras secundárias – Paredes P-01, P-02, P-06, P-07, P-08, P-09 e P-10	44 47
5.8.3 – Análise comparativa dos custos por m ² das blindagens de concreto e chumbo	53
5.9. Orçamento preliminar da obra	53
6. CONCLUSÕES	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO	61

1. INTRODUÇÃO

A aplicação das radiações ionizantes está difundida nos mais diversos setores da atividade humana, como saúde, indústria, agricultura, pesquisa e outras.

Todas as atividades que envolvam o uso das radiações devem ser monitoradas. Os equipamentos utilizados para a realização destes controles precisam estar devidamente calibrados e rastreados, sendo uma exigência da Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN (CNEN, 1988).

Da Gerência de Metrologia das Radiações (GMR) da Diretoria de Segurança do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear, faz parte o Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), que oferece serviços de calibração de detectores de radiação utilizados em radioproteção, radiodiagnóstico e radioterapia, para o IPEN e também para instalações externas, públicas e particulares.

Os “monitores de radiação” utilizados em radioproteção devem fornecer respostas dentro de limites aceitáveis de exatidão e precisão. Esta confiabilidade pode ser assegurada por meio das suas calibrações em campos padronizados de radiações. A previsão para 2009 é que em torno de 1.800 equipamentos sejam calibrados neste laboratório.

O LCI possui sistemas padrões secundários com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, e aos laboratórios primários: PTB- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Alemanha), NIST- National Institute of Standards and Technology (EUA) e NPL- National Physical Laboratory (Inglaterra).

A intercomparação constitui um dos melhores procedimentos para o programa de garantia da qualidade em determinada área de atuação, principalmente em

laboratórios de calibração, pois, além da calibração dos instrumentos, são verificados também todos os procedimentos de medição, incluindo-se o desempenho do pessoal que opera os instrumentos. Desde 1980, este Laboratório vem participando das intercomparações anuais promovidas pelo LNMRI. Todos os procedimentos e critérios para a calibração dos instrumentos no LCI seguem as recomendações internacionais (ANSI, 1977; ABNT, 1987; ANSI 1997; NPL, 1999; IAEA, 2000).

O Centro de Metrologia das Radiações (CMR) do IPEN foi constituído em dezembro de 2002, com o objetivo de agregar as atividades de calibração e dosimetria e também radiometria ambiental. Oriundo do Serviço de Proteção Radiológica do antigo Instituto de Energia Atômica (IEA) que, em 1979, passou a se chamar Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), quando foi elaborado o primeiro Plano de Emergência Radiológica e em seguida criado um grupo para atendimento de emergências radiológicas no Estado de São Paulo. Atualmente o CMR chama-se Gerência de Metrologia das Radiações (GMR).

A atividade de calibração de instrumentos detectores de radiação do IPEN iniciou-se no final da década de 70 e foi adaptando-se segundo as suas necessidades e atualmente apresenta a seguinte disposição das suas instalações: no prédio principal, junto com os outros laboratórios do GMR e salas de estudo, existem vários laboratórios de calibração com raios X e radiação alfa e beta; e na instalação Bunker, em construção isolada e semi-enterrada, localizam-se mais quatro laboratórios de calibração com radiação X e gama, com fontes de diversas atividades, dependendo da aplicação.

Os procedimentos de calibração e os testes de desempenho periódicos devem ser realizados anualmente (ANSI, 1997; CNEN, 1988)), ou ao menos a cada 14 meses (IEC, 1972; HSE, 1990), ou após o equipamento ter recebido manutenção corretiva, segundo recomendações internacionais (IEC, 1972; HSE, 1990). Desse modo, o estabelecimento de uma rotina de testes de desempenho dos instrumentos que sofreram manutenção corretiva ao longo do tempo (cerca de 20% dos equipamentos calibrados no LCI) permitirá o levantamento das alterações nas

características elétricas, ambientais e construtivas, e as especificações técnicas expressas nos manuais de operação (VIVOLO, 2000).

Para se obter uma proteção adequada contra os efeitos nocivos das radiações ionizantes é necessário que as regulamentações sejam obedecidas rigorosamente. No caso da proteção de ambientes onde existem equipamentos de raios X, devem ser seguidas as recomendações internacionais, como por exemplo os procedimentos publicados pelos órgãos internacionais para cálculos de blindagem contra radiações (NCRP, 1976; NCRP, 2004; IAEA, 2006), além das determinações nacionais impostas pela CNEN (2005).

Para o dimensionamento das barreiras de proteção devem ser observados os dados técnicos e operacionais das instalações radiológicas, estudados por SIMPKIN (1996) e COSTA (1999b), que podem ser representados principalmente pela tensão de operação e pela grandeza carga de trabalho. Esta última grandeza fornece a extensão do uso da instalação radiológica (em unidades de mA.minuto/semana). Devem também ser considerados o fator de uso, que representa a direção do feixe de radiação sobre a camada de proteção a ser calculada, e o fator de ocupação, relacionado com o tempo de permanência de pessoas nas diferentes áreas a serem protegidas (SIMPKIN and DIXON, 1998; DIXON et al, 2005). A proteção dos trabalhadores e do público em geral constitui o principal propósito da utilização das barreiras protetoras.

Nas salas do prédio principal da GMR, a blindagem utilizada é constituída pela própria alvenaria e pelas estruturas de concreto; apenas no Laboratório de raios X foram utilizadas mantas de chumbo com espessura de 1,5 mm, nas paredes, segundo as normas do NCRP (1976; 2004).

Na história da proteção contra as radiações, a utilização e o cálculo da espessura das blindagens tiveram uma grande evolução descrita por ARCHER (1995), apresentando períodos e fatos fundamentais até às metodologias de cálculo de barreiras de proteção da publicação NCRP 49 (1976). Posteriormente, formou-se um Grupo de Trabalho nos EUA, que foi denominado de Comitê Científico 9 (SC9), para uma análise mais realista dos parâmetros utilizados nos cálculos de blindagem

das salas radiológicas, que culminaram na publicação NCRP 147(2004); (ARCHER, 2005a, 2005b).

A concepção estrutural da blindagem de uma unidade radiológica requer o conhecimento dos parâmetros específicos para um determinado sistema de imagem de raios X (COSTA et al, 2007).

Para a otimização, a modernização e principalmente a segurança, e por recomendação da equipe de Radioproteção do IPEN, os laboratórios situados no prédio principal deverão ser transferidos para um local isolado em cima do Bunker.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto de um laboratório integrado de calibração de instrumentos que será uma expansão do atual Laboratório de Calibração de Instrumentos da Gerência de Metrologia das Radiações.

Esta nova construção deverá seguir os padrões de segurança (MSSVS, 2002), modernidade e praticidade, observando-se: localização, *layout*, circulação, blindagens (NCRP, 1976; NCRP, 2004) e barreiras físicas, ventilação, iluminação, conforto térmico-acústico e materiais de construção (ABNT, 1992; MTE, 1990).

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Princípios gerais de radioproteção

A base para as normas brasileiras de proteção radiológica, atualmente utilizadas está fundamentada nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, publicações nº 26 e 60 (ICRP, 1977; 1990) e na publicação CNEN (2005). A radioproteção está fundamentada em três princípios básicos:

Justificação: “Nenhuma prática que envolva exposição à radiação deve ser adotada a menos que produza um benefício líquido positivo ao indivíduo exposto ou à sociedade.”

Otimização: “Todas as exposições às radiações devem ser tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis, levando-se em conta fatores sociais e econômicos”. A aplicação desse princípio requer a otimização da proteção radiológica em todas as situações onde os procedimentos possam ser controlados por medidas de proteção, particularmente na seleção, planejamento de equipamentos, operações e sistemas de proteção. Os esforços envolvidos na proteção e no detrimento da radiação podem ser considerados em termos de custos; desta forma, uma otimização em termos quantitativos pode ser realizada com base numa análise custo-benefício.

Limitação da dose individual: “As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente efetiva estabelecidos na Norma NN 3.01 - Diretrizes Básicas de Radioproteção”, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2005), que estabelece:

- Trabalhadores: 20 *mSv/ano*;
- Indivíduos do público: 1 *mSv/ano*.

3.2 Principais grandezas e unidades de radioproteção

Na utilização das radiações ionizantes, uma das questões iniciais é como se realizar uma medição de grandezas utilizando a própria radiação ou os efeitos e os subprodutos de sua interação com a matéria.

3.2.1 Atividade (*A*)

Segundo CEMBER (1996), a atividade, *A*, de um material radioativo é definida como sendo o número de transformações nucleares que ocorrem em uma dada amostra, por unidade de tempo

$$A = kN,$$

onde:

N: número de átomos radioativos, contidos na amostra ou no material.

k: constante de desintegração; $k = \ln 2 / T_{1/2}$

$T_{1/2}$: meia-vida do radioisótopo em questão; intervalo de tempo necessário para que a atividade inicial de um radioisótopo decresça à metade.

A unidade adotada pelo Sistema Internacional (SI) para a atividade é o becquerel (Bq), que corresponde a uma desintegração radioativa por segundo.

Em relação às unidades antigas, tem-se a relação : 1 Ci = 37 G Bq.

3.2.2 Exposição

A exposição, *X*, é a grandeza física definida como sendo a quantidade total de cargas elétricas (*dQ*) por unidade de massa (*dm*), de todos os íons de um mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons no elemento de volume de ar são completamente freados no ar, isto é:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

A unidade de exposição no SI é C/kg. A unidade antiga de exposição tem como símbolo "R" (roentgen), sendo: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$.

3.2.3 Dose absorvida

A dose absorvida, D , é a quantidade de energia depositada (dE) pela radiação ionizante em qualquer meio, por unidade de massa (dm) do material absorvedor. É expressa por:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

No SI, a unidade de dose absorvida é o gray ($1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$). Nas unidades antigas era o rad, e a relação entre estas unidades é: $1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$.

3.2.4 Kerma

Kerma (*kinetic energy released in matter*) é definido como sendo a soma das energias cinéticas iniciais (dE) de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa (dm).

$$K = \frac{dE}{dm}$$

O kerma tem dimensões de energia por unidade de massa e se exprime por gray (Gy), sendo: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

3.2.5 Dose equivalente

A dose equivalente, H , é a medida da equivalência da energia absorvida pelo tecido biológico, considerando a eficácia biológica relativa (RBE), isto é, atribui-se à dose absorvida um peso característico da radiação absorvida (W_R).

A necessidade desta grandeza decorre do fato de que doses iguais de radiações podem produzir danos biológicos de diferentes intensidades. Para fins de proteção radiológica, considera-se o limite superior do fator RBE para cada tipo de radiação e o seu efeito.

$$H_T = D \cdot W_R$$

A unidade especial da dose equivalente é o sievert, cujo símbolo é Sv . No SI, a unidade é J/kg, sendo: $1\text{Sv} = 1\text{ J/kg}$.

3.3 Radioproteção

A aplicação dos regulamentos, dentro da radioproteção, constitui um pré-requisito para o uso de fontes de radiação. As autoridades competentes de cada país devem estabelecer as regras necessárias aplicáveis para as práticas, instalações, fontes e equipamentos de radiação, como também para profissionais, indivíduos do público e meio ambiente em função do grau de risco associado. (COSTA, 1999)

No Brasil, as atividades de controle regulatório no uso e nas aplicações de fontes radioativas estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Segundo Costa, 1999, compete à CNEN as atividades regulatórias das instalações nucleares, emitir regulamentos técnicos relativos à proteção radiológica e segurança nuclear, fiscalizar e autorizar o funcionamento de instalações que utilizam produtos radioativos, controlar o comércio desses produtos, armazenar rejeitos radioativos.

A Norma CNEN-NN-3.01 (CNEN, 2005) estabelece as diretrizes básicas gerais de proteção radiológica no Brasil a partir do sistema de limitação de doses

para exposições ocupacionais e do público. Também estabelece requisitos para controles básicos, responsabilidades e atribuições da direção e da supervisão de proteção radiológica em instalações nucleares e radiológicas. O sistema de limitação de dose adotado integra a justificação da prática, a otimização da proteção radiológica e a limitação das doses individuais para trabalhadores e indivíduos do público.

Em conformidade com a legislação nuclear, a CNEN não executa atividades regulatórias nas instalações de radiodiagnóstico. Entretanto, ciente da vasta utilização dos raios-X na área de radiologia, responsável por mais de 90% das exposições da população às fontes de radiação ionizante produzidas pelo homem, a CNEN tem desenvolvido competência técnico-científica e promove desde 1974 várias ações de proteção radiológica nessa área.

A Resolução nº 6, de 1988, do Conselho Nacional de Saúde (CNS, 1988), regulamenta para as autoridades sanitárias os processos de licenciamento e fiscalização dos estabelecimentos de saúde públicos e privados de medicina nuclear, radioterapia e radiodiagnóstico, estabelecendo formalmente uma complementaridade nas ações regulatórias desenvolvidas pela CNEN.

O Ministério da Saúde e o Ministério do Trabalho e Emprego, no âmbito da saúde do trabalhador, exercem atividades regulatórias específicas e consideram, como guia, a norma CNEN NN- 3.01 de proteção radiológica (CNEN, 2005). As responsabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) relativas à saúde do trabalhador incluem as ações de Vigilância Sanitária e Epidemiológica, promoção e proteção da saúde, recuperação e reabilitação dos trabalhadores submetidos a riscos e agravos das condições de trabalho.

As Diretrizes de Proteção Radiológica para Radiodiagnóstico Médico e Odontológico foram estabelecidas, em 1998, por meio da Portaria nº 453, do Ministério da Saúde (MSSVS, 1998). O escopo e os requisitos estabelecidos nesse regulamento estão baseados nas recomendações da ICRP (ICRP, 1977; 1990). (CNEN, 1988). O escopo e os requisitos estabelecidos nesse regulamento estão

baseados nas recomendações da ICRP (ICRP, 1977; 1990).

As atividades laborais com radiações ionizantes, foram enquadradas como perigosas pelo Ministério do Trabalho e Emprego em sua Lei nº 6.514, de 22.12.1977 (MTE, 1977), as Normas Regulamentadoras NR, aprovadas pela portaria 3.214, de 08.06.1978, em sua Norma Regulamentadora 16, sobre periculosidade (MTE, 1978) e estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração e da implementação, por parte de todos os empregadores e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional PCMSO - (MTE, 1978), com o objetivo de promoção e preservação da saúde dos trabalhadores.

No âmbito das normas não compulsórias, deve-se destacar o sistema desenvolvido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que, por meio de seus comitês específicos formados por representantes das empresas associadas, elabora normas técnicas brasileiras de caráter voluntário, aplicáveis aos vários segmentos da indústria. Essas normas seguem os regulamentos e as determinações legais do governo e consideram os padrões internacionais.

Na área nuclear, o Comitê Brasileiro de Energia Nuclear da ABNT tem um papel importante na padronização das especificações da fabricação e dos ensaios de equipamentos e fontes de radiação ionizante. No âmbito de protocolos de guias de prática, pode-se destacar a atuação do Colégio Brasileiro de Radiologia e da Associação Brasileira de Física Médica.

3.4 Interação da radiação X e gama com a matéria

A radiação X ou gama, segundo CEMBER (1996), pode ter a sua intensidade significativamente reduzida quando é utilizado no seu feixe um absorvedor de alta densidade. As medidas de atenuação dos raios-X ou gama devem ser realizadas sob condições de boa geometria, ou seja, com um feixe de radiação bem colimado e estreito. A relação entre a intensidade inicial (I_0) e a intensidade final (I) é dada pela relação:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

sendo:

I_0 : intensidade da radiação X ou gama sem o absorvedor

x : espessura do absorvedor

I : intensidade da radiação X ou gama transmitida através de um absorvedor com espessura x

μ : coeficiente de atenuação linear (cm^{-1})

Porém, quando não se tem uma condição de boa geometria e o feixe de radiação é polienergético, a equação anterior não é aplicável, uma vez que ela não considera os fótons que são espalhados e atingem o detector como radiação secundária. Em geral, uma fração dos fótons espalhados reincide também na direção do detector, contribuindo para o feixe transmitido e alterando o comportamento exponencial da atenuação do feixe.

Essa contribuição aditiva representa efetivamente um crescimento da intensidade do feixe em relação ao valor esperado. A diferença pode ser corrigida por um fator, denominado de fator de equilíbrio eletrônico (fator de *build-up*), que depende da energia da radiação, do material de blindagem e da sua espessura.

Dessa forma, a lei de atenuação pode ser escrita como:

$$I = B I_0 e^{-\mu x}$$

em que B é o fator de *build-up*, definido como a razão entre a intensidade da radiação, incluindo tanto a primária quanto a espalhada, em qualquer ponto de um feixe, e a intensidade primária que seria medida naquele ponto.

3.5 Proteção contra radiações ionizantes

A prática da proteção radiológica é um aspecto especial do controle dos riscos para a saúde do homem e do seu ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante. No ambiente industrial, o primeiro procedimento habitual a se implementar é a eliminação do risco. Se não é possível eliminá-lo, deve-se tentar isolá-lo. Se ambas as técnicas falharem, então é necessário proteger o trabalhador. A maneira exata de como se aplicam esses princípios gerais depende de cada situação em particular (SCAFF, 1979).

A radiação externa origina-se de máquinas de raios-X e de outras fontes especialmente designadas para produção de radiação, e a exposição de pessoas a essas fontes de radiação ionizante deve ser submetida à aplicação de uma ou mais das seguintes técnicas (CEMBER, 1996):

- Limitação do tempo de exposição;
- Maximização da distância da fonte de radiação;
- Blindagem da fonte de radiação.

3.5.1 Limitação do tempo de exposição

No ambiente de trabalho, onde existe uma fonte de radiação ionizante, com uma determinada taxa de dose, verifica-se que a dose acumulada por uma pessoa exposta a essa radiação, nesse ambiente, é diretamente proporcional ao tempo que ela permanece na área e pode ser controlada pela limitação desse tempo. A restrição do tempo de exposição é necessária para que o indivíduo exposto à radiação ionizante não exceda o valor máximo de dose admitido fazendo com que o trabalho seja realizado de acordo com os critérios de segurança do ponto de vista da radioproteção (CEMBER, 1996).

3.5.2 Distância da fonte de radiação

A exposição à radiação gama decresce com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o alvo. Assim, a maximização da distância da fonte de radiação é uma providência que visa proteger o homem, reduzindo o nível de radiação ao qual estaria sujeito (CEMBER, 1996).

3.5.3 Blindagem da fonte de radiação

A redução do nível de radiação ionizante, em um ambiente onde existe uma fonte de radiação, segundo CEMBER (1996), é alcançada por meio da blindagem dessa fonte.

Entretanto, a eficiência da blindagem da instalação depende, entre outros fatores, do material a ser utilizado e do tipo de radiação emitida pela fonte.

3.5.4 Camada semi-redutora

O coeficiente de atenuação total (μ) depende do material atenuador e da energia do feixe incidente. No caso de uma fonte que emite fótons de várias energias, deve-se utilizar diferentes valores de (μ), correspondentes às diversas energias do feixe e às diversas taxas de emissão de cada fonte de radiação. Na determinação da espessura de um material absorvedor para ser utilizado na blindagem ou para a atenuação da radiação, para feixe monoenergético e de boa geometria, pode-se utilizar o método da camada semi-redutora (CSR), definida como sendo a espessura de material que reduz à metade a intensidade do feixe de fótons de raios-X ou gama (SCAFF, 1979).

Da mesma forma que a CSR, outro parâmetro muito utilizado no cálculo de espessuras de blindagem é a camada deci-redutora (CDR), definida como sendo a espessura de material que atenua por um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons de radiação X ou gama.

3.6. Metrologia das radiações

Com a finalidade de efetuar as medidas de campos de radiação para fins de pesquisa, controle do material radioativo no meio ambiente em processos industriais e também na proteção radiológica, os detectores de radiação devem estar devidamente calibrados dentro de limites aceitáveis de exatidão, segundo recomendações internacionais específicas (VIVOLO, 2000).

3.6.1 Detectores de radiação

Um detector de radiação é um instrumento utilizado para detectar radiações, que funciona a partir de um material ou dispositivo sensível às radiações, capaz de produzir um sinal resposta, possível de ser medido ou analisado. A interação do meio detector com a radiação pode ocorrer por diversos processos pelos quais as radiações diferentes podem interagir com o material utilizado para se medir ou se indicar as características dessas radiações. Pode-se destacar os detectores mais utilizados em radioproteção:

- **Detectores Geiger-Müller** - São denominados detectores a gás, pois são preenchidos com gás (com características conhecidas e adequadas à finalidade de medir campos de radiação) em seu interior, que tem como função ser o elemento detector da radiação.
- **Detectores por cintilação** - São desenvolvidos com base nas propriedades que algumas substâncias possuem de absorver a energia cedida pelas radiações ionizantes e convertê-las em luz. Por esse princípio tais materiais são denominados cintiladores.
- **Câmaras de ionização** - Utilizando o ar como elemento detector gasoso, as câmaras de ionização são capazes de medir diretamente a grandeza exposição. Para cada par de íon gerado pela partícula incidente no interior do volume sensível do detector gasoso, um sinal elétrico é coletado.

Neste trabalho foram utilizados detectores Geiger-Müller e por isso a ênfase será dada a este tipo de detector de radiação.

Os detectores Geiger-Müller constituem-se nos detectores mais utilizados e também o seu princípio de funcionamento é muito conhecido desde as primeiras experiências com feixes de radiação. Estes detectores foram introduzidos em 1928 e têm como principais características a simplicidade de construção, boa sensibilidade, custo baixo e facilidade de manutenção, sendo empregados largamente nas monitorações de área. Basicamente, um detector a gás é constituído de um cilindro condutor revestido de material condutor, que funciona como catodo, e um filamento central denominado anodo. O volume do detector (cilindro) é preenchido por gás ou por uma mistura de gases, a uma pressão relativamente baixa (menor que a pressão atmosférica).

Entre o catodo e o anodo é aplicada uma diferença de potencial, geralmente da ordem de centenas de Volts. O processo de detecção da radiação tem início quando uma partícula, carregada ou não, atravessa o gás no interior do cilindro, ocorrendo uma ionização. Os pares de íons formados são coletados pelos eletrodos (anodo e catodo), produzindo a corrente de ionização.

O intervalo de tensão aplicado leva à ocorrência de um campo elétrico entre os eletrodos (anodo e catodo) do elemento detector, capaz de fornecer energia suficiente para os pares de íons produzidos; ao se deslocarem para os respectivos eletrodos, esses pares de íons produzem mais ionizações. Este processo é conhecido como “multiplicação de cargas”, que é um fenômeno que independe do tipo de partícula e da sua energia.

Existem detectores Geiger-Müller de várias formas e diversos tamanhos, elaborados com diferentes materiais (tanto a janela do tubo como o seu corpo). São muito utilizados em monitoração de área, devido a sua alta eficiência na detecção de partículas.

Estes monitores portáteis são encontrados comercialmente em diferentes configurações; dentre elas pode-se citar: monitores com sonda detectora externa, monitores com tubo interno, etc. As sondas externas podem ainda conter tampas removíveis ou capas deslizantes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Principais equipamentos a serem transferidos para o prédio a ser ampliado:

Os seguintes equipamentos deverão ser transferidos para as instalações de ampliação do Laboratório de Calibração de Instrumentos:

4.1. Equipamentos de raios X:

1. Equipamento de raios X, marca Pantak, modelo HF, EUA, que opera entre 1 e 320 kV.

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, semicondutores, cintiladores e outros), nas qualidades de radiação, níveis radioterapia e radioproteção .

Este equipamento localiza-se atualmente no Bunker e será transferido também para a parte superior nova, do prédio a ser ampliado.

2. Equipamento de raios X, marca Siemens, modelo Stabilipan, Alemanha que opera entre 150 e 220 kV.

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, semicondutores, cintiladores e outros), nas qualidades de radiação, nível radioproteção .

3. Equipamento de raios X, marca Rigaku Denki, modelo Geigreflex, Japão, com tubo Philips, modelo PW 2184100, Holanda, que opera de 20 a 60 kV.

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, semicondutores, cintiladores e outros), nas qualidades de radiação, níveis radioterapia, radioproteção e mamografia.

4. Equipamento de raios X diagnóstico, marca Medicor, modelo Neo Diagnostomax, Hungria, operando de 10 a 125 kV.

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, semicondutores, cintiladores e outros, nas qualidades de radiação, nível radiodiagnóstico.

5. Equipamento de raios X, marca Pantak/Seifert, modelo ISOVOLT 160 HS, que opera entre 5 e 160 kV.

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, semicondutores, cintiladores e outros), nas qualidades de radiação, níveis radioterapia, radiodiagnóstico, radioproteção e mamografia.

4.1.2 Sistemas de radiação alfa e beta

- Laboratório de Calibração Alfa e Beta, com 2 sistemas de calibração de:

- a) Detectores de contaminação, com as seguintes fontes planas:

Radiação alfa : ^{241}Am

Radiação beta : ^{14}C , ^{99}Tc , ^{137}Cs , ^{36}Cl e $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

- b) Detectores beta-gama, com fontes seladas de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl , ^{147}Pm e ^{85}Kr .

Aplicações: irradiação de amostras e calibração de medidores de radiação (câmaras de ionização, detectores Geiger-Müller, cintiladores, *pancakes* e outros), utilizados para fins de terapia e radioproteção.

4.2 Parâmetros de utilização dos equipamentos de raios X

Para o dimensionamento das barreiras de proteção, é fundamental o conhecimento da operação dos equipamentos, ou seja, a tensão e a corrente de trabalho, a distância do tubo de raios X ao instrumento que será calibrado e também a área do campo necessário para a calibração. Na Tabela 4.1 estão os detalhes de utilização dos equipamentos de raios X.

Tabela 4.1- Detalhes da operação dos equipamentos de raios X

Laboratório	Tensão do equipamento (kV)	Operação (kV / mA)	Tempo Anual de Operação (min)	Distância* (m)	Área** (cm ²)
Raios X1	60	35 / 30	1350	2,0	706
	125	90 / 5	1350	1,0	123
Raios X2	160	50 / 25	900	2,5	706
	160	40 / 20	900	2,5	706
	220	150 / 20	900	2,0	706
Raios X3	320	320 / 13	700	1,0	100
	320	200 / 13	1000	1,0	100
	320	100 / 13	1000	1,0	100

* Distância entre o alvo do tubo de raios X e o ponto de calibração.

** Área do campo de radiação no ponto de calibração.

4.3 Equipamentos utilizados para as medições nos levantamentos radiométricos

- Monitor de radiação portátil Geiger-Müller/Graetz 50DE- Série 12448 , com Certificado de Calibração IPEN nº 0100/ 2007, e Telescope Probe DL- Série 175579, com Certificado de Calibração IPEN nº 0099/ 2007 (Figura 4.1)

**Figura 4.1 – Monitor de radiação portátil
Geiger-Müller/ Graetz 50DE**

- Monitor de radiação portátil Geiger-Müller –Automess Modelo 6150 AD5 - Série 107139, com Certificado de Calibração IPEN nº 0158/ 2007, e Teletector Probe 6150 AD-t- Série 107466, com Certificado de Calibração nº 0159/ 2007 (Figura 4.2)

**Figura 4.2 – Monitor de radiação portátil
Geiger-Müller – Automess Modelo 6150 AD5**

5. RESULTADOS

Para a definição e a execução do projeto de expansão do Laboratório de Calibração de Instrumentos, da Gerência de Metrologia das Radiações, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, foram definidas inicialmente as premissas e as necessidades.

O terreno para a implantação do novo Laboratório de Calibração de Instrumentos tem divisa aos fundos com o Galpão de Rejeitos Radioativos do IPEN e também com o Bunker, localizado abaixo do terreno, que em suas atividades apresenta fontes radioativas.

Na Figura 5.1 pode-se observar a foto do Bunker e da parte externa do terreno em cima do qual se deseja ampliar o LCI. A Figura 5.2 mostra a foto do local com a projeção do Bunker e a área de intervenção do projeto. Na Figura 5.3 tem-se a projeção do Bunker na planta planialtimétrica, com detalhe para a projeção da futura expansão dos galpões de estocagem de rejeitos radioativos.

O prédio principal do Laboratório de Calibração de Instrumentos é atualmente composto de várias salas de estudo de pesquisadores, técnicos, bolsistas e de laboratórios, que dividem o espaço físico com outras atividades da GMR.

O projeto originalmente datado de 1971, de autoria dos Arquitetos Adolpho Rubio Morales e Fábio Kok de Sá Moreira, foi desenvolvido para o que seria, na época, a futura Divisão de Radiobiologia. Na planta da Figura 5.4 podem ser observados todos os laboratórios e as salas com as suas utilizações específicas.

Atualmente o Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) ocupa diversas salas apresentadas na planta da Figura 5.5.

FIGURA 5.1

Figuras 5.2 e 5.3

Figura 5.4 e 5.5

Para a nova construção pretende-se transferir os equipamentos e sistemas principais, já descritos no capítulo 4: 5 equipamentos de raios X, dois sistemas padrões secundários de radiação beta, um sistema de calibração de detectores de contaminação, além de estabelecer um sistema de calibração de activímetros, atualmente localizado no Centro de Radiofarmácia CR/IPEN, por problemas de segurança radiológica (manuseio de fontes não seladas) e de um laboratório de pesquisa em dosimetria.

5.1 Levantamentos radiométricos

Para o conhecimento da intensidade das radiações existentes no local, foi necessário realizar um levantamento radiométrico inicial, na sua vizinhança, e também a medição da intensidade da radiação na laje externa do teto do Bunker (abaixo da camada atual de terra).

Na área externa do Bunker, foram realizados levantamentos radiométricos no terreno e em seu entorno. Foram selecionados, pela equipe de Radioproteção, 13 pontos para análise externa, abrangendo toda a área do terreno e principalmente os limites de vizinhança com o Galpão de Rejeitos Radioativos.

As medições foram realizadas com acompanhamento de técnicos da Gerência de Radioproteção, em 28 de março de 2007, e repetidos nos dias 17 e 23 de julho de 2008, utilizando-se o monitor de radiação portátil Geiger-Müller/Graetz 50DE- Série 12448 e sonda Telescope Probe DL- Série 175579.

Na instalação Bunker há 5 laboratórios de calibração de instrumentos, com radiação X e com fontes de atividades diversas.

Foram escavados 4 buracos na terra, em cima do Bunker, nos pontos mais críticos em termos de radiação, chegando-se até a laje do Bunker. Para isto foi utilizado um “trado-escavadeira” manual, com haste de 3 metros, que é um equipamento muito utilizado em construção civil para cavar buracos, principalmente em brocas para fundações, sendo semelhante a um “saca-rolha” gigante.

As medições dentro dos buracos escavados no terreno, acima da laje de cobertura do Bunker, foram realizadas com o monitor de radiação portátil Geiger-Müller – Automess Modelo 6150 AD5 - Série 107139 e a sonda Teletector Probe 6150 AD-t- Série 107466.

Todos os pontos do levantamento radiométrico estão demarcados na planta da Figura 5.6.

Nos pontos abaixo do solo, a medição foi realizada, utilizando-se o medidor portátil de radiação com sensor telescópico, que foi inserido em cada buraco, medindo-se a intensidade da radiação na laje do teto do Bunker.

Para a nova construção haverá a remoção de uma camada de 2,20 m de terra do terreno, e o prédio ficará apoiado a 0,50 m acima da laje do teto do Bunker.

Figura 5.6

Nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 estão os resultados obtidos dos levantamentos radiométricos realizados.

Tabela 5.1 – Levantamento radiométrico no terreno e vizinhança em 28/03/07

Equipamento de Medição: Monitor de Radiação Portátil Geiger-Müller Graetz 50DE				
Ponto de Medição	Descrição	Horário : 10:20 h Taxa de dose (µSV/h)		
BG	Radiação de Fundo	0,09	0,09	0,09
P1	Poste de Observação	0,42	0,47	0,33
P2	Árvore	0,14	0,09	0,52
P3	Pilar 1 da Cerca	0,47	0,85	0,23
P4	Pilar 2 da Cerca	0,23	0,33	0,61
P5	Pilar 3 da Cerca	0,23	0,09	0,23
P6	Pilar 4 da Cerca	0,00	0,56	0,00
P7	Respiro	0,00	0,00	0,13
P8	Pilar 3 da Cerca	3,85	4,09	4,37
P9	Pilar 6 da Cerca	9,37	10,90	10,40
P10	Pilar de Concreto	0,90	1,09	1,23
P11	Início do Corrimão	0,09	0,23	0,23
P12	Toco de Árvore	0,23	0,00	0,71
P13	Tampo de Concreto	0,23	0,38	0,00

Tabela 5.2 – Levantamento radiométrico no terreno e vizinhança em 17/03/08

Equipamento de Medição :Monitor de Radiação Portátil Geiger-Müller Graetz 50DE										
Ponto de Medição	Descrição	Horário : 14:20 h Taxa de dose (µSV/h)			Horário : 15:12 h Taxa de dose (µSV/h)			Horário : 16:18 h Taxa de dose (µSV/h)		
BG	Radiação de Fundo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1	Poste de Observação	0,23	0,19	0,12	0,21	0,19	0,13	0,20	0,15	0,00
P2	Árvore	0,47	0,23	0,09	0,48	0,20	0,12	0,42	0,21	0,11
P3	Pilar 1 da Cerca	0,37	0,28	0,09	0,34	0,15	0,00	0,30	0,25	0,10
P4	Pilar 2 da Cerca	0,13	0,00	0,11	0,14	0,09	0,00	0,14	0,10	0,10
P5	Pilar 3 da Cerca	0,26	0,18	0,01	0,18	0,00	0,00	0,15	0,10	0,00
P6	Pilar 4 da Cerca	0,00	0,00	0,00	0,15	0,11	0,02	0,10	0,00	0,08
P7	Respiro	0,10	0,13	0,12	0,10	0,10	0,08	0,12	0,00	0,00
P8	Pilar 3 da Cerca	2,08	1,98	1,76	1,85	1,70	1,45	1,98	1,65	1,44
P9	Pilar 6 da Cerca	6,45	5,85	5,48	6,33	5,60	5,45	6,03	5,45	5,21
P10	Pilar de Concreto	2,18	1,95	1,85	1,93	1,78	1,63	1,98	1,80	1,75
P11	Início do Corrimão	0,03	0,00	0,01	0,15	0,00	0,00	0,15	0,13	0,00
P12	Toco de Árvore	0,12	0,09	0,00	0,20	0,13	0,00	0,19	0,16	0,13
P13	Tampo de Concreto	0,17	0,12	0,02	0,20	0,20	0,12	0,21	0,14	0,11

Tabela 5.3 – Levantamento radiométrico no terreno e vizinhança em 23/07/08

Equipamento de Medição: Monitor de Radiação Portátil Geiger-Müller Graetz 50DE- e Telescope Probe DL							
Ponto de Medição	Descrição	Horário : 15:00 h Taxa de dose (µSV/h)			Horário : 15:20 h Taxa de dose (µSV/h)		
BG	Radiação de Fundo	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
P1	Poste de Observação	0,46	0,50	0,52	0,40	0,43	0,35
P2	Árvore	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
P3	Pilar 1 da Cerca	0,11	0,17	0,21	0,14	0,09	0,13
P4	Pilar 2 da Cerca	0,10	0,17	0,23	0,10	0,11	0,06
P5	Pilar 3 da Cerca	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01
P6	Pilar 4 da Cerca	0,00	0,15	0,00	0,00	0,05	0,09
P7	Respiro	0,13	0,17	0,09	0,06	0,06	0,06
P8	Pilar 3 da Cerca	2,08	1,98	1,76	1,85	1,70	1,45
P9	Pilar 6 da Cerca	6,45	5,85	5,48	6,33	5,60	5,45
P10	Pilar de Concreto	2,18	1,95	1,85	1,93	1,78	1,63
P11	Início do Corrimão	0,03	0,00	0,01	0,06	0,00	0,00
P12	Toco de árvore	0,03	0,00	0,00	0,11	0,10	0,00
P13	Tampo de Concreto	0,17	0,12	0,09	0,20	0,20	0,12

Tabela 5.4 - Levantamento radiométrico na laje do teto do Bunker em 23/07/08

Equipamento de Medição: Monitor de Radiação Portátil Geiger-Müller Automess Modelo 6150 AD5 e Teletector Probe 6150 AD-t									
Ponto de Medição	Descrição	Horário : 14:15 h Taxa de dose (µSV/h)			Horário : 15:05 h Taxa de dose (µSV/h)			Horário : 16:09 h Taxa de dose (µSV/h)	
BG	Radiação de Fundo	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
P14	Acima do Bunker	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,06	0,05
P15	Acima do Bunker	0,03	0,05	0,02	0,09	0,02	0,00	0,04	0,06
P16	Est. Meteorológica	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03
P17	Est. Meteorológica	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03

Como previsto, a proximidade do galpão de rejeitos radioativos indicou os maiores valores do levantamento radiométrico, como nos pontos P8, P9 e P10, mas mesmo assim são valores extremamente baixos, que não ocasionarão interferência neste novo projeto, tomando-se como parâmetro a Norma CNEN NN 3.01 (2005), que preconiza a dose equivalente efetiva para público em 1 mSV por ano, ou seja, em torno de 2.000 horas anuais, para 8 horas diárias.

No levantamento radiométrico, a maior intensidade de radiação foi no ponto de medição P9, realizado em 28/03/07, acusando 10,90 µSV. Como o local não constitui uma passagem, adotando-se uma hipótese muito remota, de que uma pessoa do público permanecesse por 20 minutos nesse local diariamente, ter-se-ia

anualmente um tempo de exposição de aproximadamente 80 horas, que daria uma dose equivalente efetiva de 0,87 mSv; ou seja, ainda menor que o limite para público de 1 mSv/ ano.

Pode-se concluir que a intensidade de radiação existente no local escolhido para o futuro LCI não é preocupante ou passível de comprometer as novas instalações. Mesmo assim, como medida preventiva, recomenda-se a proibição de circulação de pessoas no local em questão.

5.2 Sala de controle e laboratórios

Para otimização e funcionalidade dos espaços e também para um fluxo de trabalho melhor e principalmente para a maior segurança em termos de radioproteção (CNEN, 2005), ficou definido que os laboratórios ficariam em área isolada e os controles dos equipamentos ficariam externamente, na Sala de Controle.

A localização da construção deverá observar a exposição mínima de radiação para o público e para os trabalhadores (MSSVS, 1998; CNEN, 2005). No projeto final definiu-se a localização da sala de controle e dos laboratórios, aos fundos do terreno, onde praticamente não há circulação de pessoas, por recomendação da equipe de Radioproteção, que acompanhou o desenvolvimento deste projeto.

Para minimizar mais ainda a exposição às radiações, foi definido um corredor interno onde não haverá circulação de pessoas, que pode ser utilizado como jardim, tornando o ambiente mais agradável e mais seguro em termos de radioproteção. Na Figura 5.7 pode-se facilmente localizar o jardim interno.

Figura 5.7

Figura 5.8a

Figura 5.8b

Figura 5.9a

Figura 5.9b

5.3 Projeto final

Foram levantadas as dimensões das salas existentes atualmente no LCI e foram entrevistados todos os seus funcionários, com o intuito de quantificar as suas reais necessidades e também para observar os procedimentos e as soluções, para que haja uma otimização do fluxo de trabalho. No projeto foi definida a quantidade de salas em relação aos profissionais existentes: pesquisadores, técnicos, bolsistas e estagiários.

No setor de recebimento e entrega de instrumentos foram observadas algumas necessidades específicas, que foram implementadas no projeto:

1. Sala de atendimento aos clientes, evitando-se assim a sua livre circulação dentro do setor de recepção e entrega, atendendo à norma NBR ISO/IEC 17025 (2005), quanto aos aspectos de confidencialidade de informações, entre outras.
2. Sala de acondicionamento de equipamentos recebidos, ou calibrados, para a entrega e também acondicionamento das embalagens e manuais técnicos.

Na Figura 5.7 pode-se ver estas salas com uma boa distribuição dos setores do Laboratório de Calibração de Instrumentos. Logo após a rampa de acesso (Figuras 5.8a, 5.8b, 5.9a e 5.9b, plantas em perspectiva) tem-se o setor de recepção e entrega de equipamentos, agora com uma sala exclusiva para a guarda de equipamentos e manuais técnicos, propiciando assim uma total segurança. Também foi incorporada a sala de atendimento aos clientes, proporcionando um maior conforto e principalmente limitando o seu acesso às outras áreas.

A sala da manutenção eletrônica, próxima à recepção e entrega de equipamentos, facilitará o fluxo entre os dois setores, que trabalham interligados.

Uma sala de reuniões foi projetada com uma copa ao seu lado, facilitando assim o serviço de café e apoio. Os sanitários foram dimensionados para a quantidade de funcionários e bolsistas previstos.

As salas para os bolsistas, pesquisadores e funcionários do LCI são amplas, iluminadas e ventiladas, garantindo o conforto necessário nestas atividades intelectuais, acompanhando os preceitos da ergonomia (TEM,1990). A Sala de Controle dos equipamentos dos laboratórios é bem ampla e nesta disposição possibilita aos técnicos o uso de vários sistemas de radiação simultaneamente. O acesso à Sala de Controle e aos laboratórios por apenas uma porta será controlado, aumentando-se a segurança do LCI como um todo.

No laboratório dos activímetros foi prevista uma gaveta giratória de recebimento e entrega das fontes não seladas, mas blindadas, podendo esta operação ser realizada sem a necessidade do funcionário entregador das fontes adentrar as instalações. Neste laboratório, para o caso de uma possível contaminação, existirá uma pia com água para a limpeza e descontaminação, sendo este efluente drenado por uma ralo ou grelha no piso e direcionado para um tanque de retenção enterrado, para o decaimento do efluente radioativo e o seu posterior descarte.

A disposição dos laboratórios de raios X, voltados para o fundo da construção, foi a melhor solução em termos de radioproteção.

O jardim interno aumenta a segurança dos trabalhadores e também fornece a iluminação e a ventilação necessárias para as salas no corpo interno da construção.

5.4 Sobrecarga no Bunker.

Para não haver riscos de sobrecarga devido à construção em cima do Bunker, ficou definido que os laboratórios que necessitam de blindagem adicional em sua alvenaria e por conseguinte um maior sobrepeso, não ficarão sobre o Bunker. No

projeto todas as áreas de laboratórios e da Sala de Controle estão fora da projeção do Bunker.

Para minimizar ainda mais o efeito de sobrecarga sobre o Bunker, toda a construção das salas acima dele vão descarregar o seu peso próprio em duas vigas na frente e nos fundos do Bunker, numa laje tipo “tabuleiro”. Funcionará como se a construção estivesse apoiada sobre uma estrutura num formato de mesa, onde o tampo da mesa seria a laje tabuleiro e os pés, os pilares, que irão descarregar sua sobrecarga em duas vigas no terreno, evitando assim a distribuição de cargas sobre o Bunker (Vide Figuras 5.10 e 5.11).

5.5 Limites anuais de exposição.

Como nas atividades desenvolvidas no LCI não pode haver interferência de significativos níveis de radiação externa da vizinhança, o nível do limite de exposição anual ao público definido pela CNEN em sua Norma NN 3.01 (2005) em 1,0 mSv / ano será respeitado. Trabalhando-se nestes níveis, a precisão da calibração não será comprometida.

5.6 Segurança em termos da radioproteção.

As barreiras físicas dos laboratórios foram determinadas segundo a norma NCRP 49 (1976), utilizando materiais construtivos de mercado e levando-se em conta as opções de custo mais baixo do mercado e obtendo-se assim a melhor relação custo/ benefício possível.

Apesar da existência de uma norma mais recente, a NCRP 147 (2004), ela é mais voltada para equipamentos da área hospitalar com tensão máxima de 150 kV, que não é o caso do LCI, que possui equipamentos de até 320 kV.

5.7 Determinação das blindagens dos laboratórios

Para o cálculo das blindagens necessárias para as paredes dos laboratórios de raios X (vide detalhes na Figura 5.12), foi utilizada a norma NCRP 49 (1976), que aborda equipamentos de até 400 kV.

Figura 5.10

Figura 5.11

Figura 5.12

Para a blindagem das portas dos laboratórios de raios X, PEDROSA et al (2004) recomendaram alguns critérios para o cálculo das barreiras.

Quando a espessura da barreira protetora ultrapassar a espessura de 50 a 300 cm de concreto, FONDEVILLA et al (2008) sugeriram algumas simplificações nos cálculos de blindagem para a cobertura, devido ao ângulo de incidência..

Apesar da norma NCRP 49 (1976) citar para o cálculo das blindagens materiais como concreto e chumbo, SALINAS (2006) desenvolveu uma metodologia baseada em fatores de conversão para o uso de materiais de construção tipicamente brasileiros.

O uso de colimadores, com a finalidade de direcionar e concentrar os feixes de radiação, é amplamente utilizado nos aparelhos de raios X; KÜNZEL et al (2008) realizaram experimentos, verificando uma diminuição bastante acentuada da radiação de fuga e uma conseqüente diminuição na espessura das blindagens de proteção.

5.8 Metodologia para o cálculo de blindagens do NCRP 49

Existem 3 métodos básicos para se garantir que os requisitos de proteção radiológica sejam respeitados:

- A proteção pela distância, que envolve a lei do inverso do quadrado da distância;
- A redução do tempo de permanência em um local onde exista radiação, que envolve a adequação dos procedimentos de trabalho; e
- A proteção pela interposição de uma barreira protetora entre a fonte e o ambiente que se deseja proteger.

A norma NCRP 49 (1976) trata dos requisitos e da metodologia para o cálculo de barreiras protetoras para salas com a emissão de radiação para fins médicos.

Basicamente, a metodologia apresentada neste trabalho consiste em se calcular a espessura, em chumbo ou em concreto, de barreiras protetoras contra a radiação primária e/ou secundária (espalhada pelas paredes, piso e teto, e radiação de fuga) de radiação X ou gama. Esta metodologia prevê a proteção por uma barreira primária (radiação devida ao feixe principal) para reduzir a níveis aceitáveis de radiação a uma certa distância (d_p) da fonte, e por uma barreira secundária (radiação de fuga e de espalhamento), que manterá níveis aceitáveis de radiação a uma certa distância (d_s) da fonte.

A metodologia da norma NCRP 49 utiliza ainda, o fator de uso, que se relaciona com a direção do feixe primário (que no caso da calibração de instrumentos sempre será 1, ou seja, 100% do tempo em uma direção), e do fator de ocupação, que se relaciona com o tipo de ocupação da vizinhança às salas de raios X e gama.

Os valores de **T – Fator de Ocupação**, pela norma NCRP 49(1976) são:

T=1 (ocupação total): áreas de trabalho, como controle, consultórios, escritórios, laboratórios, oficinas, enfermarias, postos de enfermagem e edifícios vizinhos ocupados, como residências, escolas, etc.

T= 1/4 = 0,25 (ocupação parcial): salas de espera, salas de repouso ou de recuperação, copas, etc.

T= 1/16 = 0,0625 (ocupação eventual): corredores, banheiros, escadas, depósitos de material, áreas de ventilação ou de iluminação, áreas externas usadas para tráfego de pessoas ou veículos (passeios e ruas), etc.

A seguir são apresentados os cálculos das barreiras primárias e secundárias do projeto do novo laboratório do LCI segundo a norma NCRP 49 (1976).

5.8.1 -Cálculo das barreiras primárias - Paredes P-03, P-04 e P-11

Os Laboratórios de Raios X 1, Raios X 2 e Raios X 3, na direção dos feixes primários, fazem divisa com áreas externas.

O quociente de kerma, devido à radiação do feixe primário, é dado pela norma NCRP 49 (1976) como:

$$K_{ux} = \frac{P (d_{prim})^2}{W U T} \quad [\text{mGy.mA}^{-1}.\text{min}^{-1}]$$

sendo que:

- **P** é o limite autorizado derivado semanal para pontos externos à barreira primária e pela CNEN NN 3.01 (2005) :

Trabalhadores: **P**= 20 mSv/ ano = 0,4 mSv/sem

Público: **P**= 1 mSv/ ano = 2. 10⁻²mSv/sem

- **d_{prim}** é a distância em metros, entre o alvo e o ponto a ser protegido;

- **W** é a carga de trabalho em (mA x min/ sem);

- **U** é o fator de uso, sendo que neste caso é 100% na mesma direção; **U**= 1;

- **T** é o fator de ocupação para área externa; **T**= 1/ 16 = 0,0625.

Os cálculos e os dados das componentes da expressão para a obtenção do quociente de kerma (**K_{u,x}**), devido à radiação do feixe primário, para o dimensionamento das barreiras primárias, estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5- Dimensionamento das barreiras primárias

Labora- tório	Tensão (kV)	W (mA.min/sem)	P (mGy/sem)	d_{prim} (m)	U	T	K_{u,x} (mGy.mA⁻¹.min⁻¹)
Raios X1	60	843,75	2x10 ⁻²	8,00	1	0,0625	2,43.10 ⁻³
	125	140,63	2x10 ⁻²	8,00	1	0,0625	1,46. 10 ⁻¹
Raios X2	160	468,75	2x10 ⁻²	10,60	1	0,0625	9,59.10 ⁻³
	220	375,00	2x10 ⁻²	10,60	1	0,0625	9,59.10 ⁻³
Raios X3	320	270,83	2x10 ⁻²	8,00	1	0,0625	7,56. 10 ⁻²

Com os valores de **K_{u,x}**, foram utilizados os gráficos (Figura 5.13) do apêndice D da norma NCRP 49 (1976) e determinadas as espessuras de blindagem de chumbo e de concreto, segundo a curva de tensão de trabalho de cada equipamento de raios X, que estão apresentados na Tabela 5.6.

Figura 5.13 Gráfico da Norma NCRP 49- Apêndice D (NCRP, 1976)

Tabela 5.6 - Dimensionamento final das barreiras primárias dos laboratórios

Raios X 1		Raios X 2		Raios X 3	
Equipamentos 60 e 125 (kV)		Equipamentos 160 e 220 (kV)		Equipamento 320 (kV)	
Parede P-03 Blindagem		Parede P-11 Blindagem		Parede P-04 Blindagem	
Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)
1,0	9,8	2,4	15,2	7,1	25,0

Pode-se observar que a maior espessura de blindagem para o feixe primário deverá ser na parede P-04 do Laboratório do Raios X 3, devido à maior tensão de trabalho (320 kV).

5.8.2 -Cálculo das barreiras secundárias – Paredes: P-01, P-02, P-06, P-07, P-08, P-09 e P-10

As paredes P-01 e P-06 fazem divisa com a Sala de Controle, onde estarão os trabalhadores. As paredes P-02, P-07, P-08, P-09 e P-10 fazem divisa com áreas externas.

Para o cálculo das barreiras secundárias deve-se considerar os dois tipos de radiações existentes:

- Radiação de fuga, que é a radiação não pertencente ao feixe útil, mas que consegue atravessar o tubo de raios X;
- Radiação de espalhamento, que é a radiação proveniente do rebatimento ou espalhamento no anteparo, nos equipamentos, nas paredes, no piso e no teto da sala.

O quociente de kerma, devido à radiação espalhada, é dado pela norma NCRP 49 (1976) como:

$$K_{ux} = \frac{P(d_{sca})^2 (d_{sec})^2 400}{a W T F} \quad [\text{mGy.mA}^{-1}.\text{min}^{-1}]$$

sendo que:

- **P** é o limite autorizado semanal para pontos externos a barreira primária;
- **d_{sca}** é a distância, em metros, entre o alvo e a fonte espalhadora;
- **d_{sec}** é a distância, em metros, entre a superfície espalhadora e o ponto a ser protegido;
- **a** é a razão entre a intensidade da radiação espalhada a 1m do meio espalhador e a intensidade da radiação primária no isocentro; depende da energia do feixe e do ângulo de espalhamento. Foi utilizada a pior condição na Tabela B-2 – do apêndice B da norma NCRP 49;
- **W** é a carga de trabalho em (mA x min/ sem);
- **T** é o fator de ocupação;
- **F** é o tamanho do campo no anteparo em cm².

Os cálculos e os dados das componentes da expressão para a obtenção do quociente de kerma ($K_{u,x}$) devido à radiação espalhada estão apresentados na Tabela 5.7

Tabela 5.7- Dimensionamento das barreiras secundárias- espalhamento

Laboratório	Tensão (kV)	W (mA.min/sem)	P (mGy/sem)	d _{sca} (m)	d _{sec} (m)	a 135° (10 ⁻³)	T	F (cm ²)	K _{u,x} (mGy.mA ⁻¹ .min ⁻¹)
Raios X1	60	843,75	2x10 ⁻²	2,0	1,90	1,10	1	706	1,76. 10 ⁻¹
	125	2531,25	2x10 ⁻²	1,0	1,90	2,50	1	123	3,71. 10 ⁻²
Raios X2	220	468,75	2x10 ⁻²	2,0	2,30	2,80	0,0625	706	1,41
	160	375,00	2x10 ⁻²	2,0	2,30	2,70	0,0625	706	2,10
Raios X3	320	189,58	2x10 ⁻²	1,0	3,2	2,90	0,0625	100	1,68

O quociente de kerma, devido à radiação de fuga, é dado pela norma NCRP 49 (1976) como:

$$K_{ux} = \frac{P (d_{sec})^2 600 I}{W T} \quad [\text{mGy.mA}^{-1}.\text{min}^{-1}]$$

sendo que:

- **P** é o limite autorizado derivado semanal para pontos externos à barreira primária;
- **d_{sec}** é a distância em metros, entre a superfície espalhadora e o ponto a ser protegido;
- **I** é a corrente de trabalho do equipamento de raios X, em (mA)
- **W** é a carga de trabalho em (mA x min/ sem);
- **T** é o fator de ocupação.

Os cálculos e os dados das componentes da expressão para a obtenção do quociente de kerma ($K_{u,x}$), devido à radiação de fuga, estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Dimensionamento das barreiras secundárias- fuga

Laboratório.	Tensão (kV)	W (mA.min/sem)	P (mGy/sem)	d_{sec} (m)	T	I (mA)	K_{u,x} (mGy.mA⁻¹.min⁻¹)
Raios X1	60	843,75	2×10^{-2}	1,90	1	30	1,54.
	125	2531,25	2×10^{-2}	1,90	1	5	$8,56 \cdot 10^{-2}$
Raios X2	220	468,75	2×10^{-2}	2,30	0,0625	20	1,41
	160	375,00	2×10^{-2}	2,30	0,0625	20	2,10
Raios X3	320	189,58	2×10^{-2}	3,15	0,0625	13	$2,18 \cdot 10^{-1}$

Como já visto, a camada semi-redutora (CSR) é definida como sendo a espessura de material que reduz à metade a intensidade do feixe de fótons de raios X. A camada deci-redutora (CDR) é definida como sendo a espessura de material que atenua por um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons de radiação X. Na Tabela 5.9 estão apresentados os valores dos CSR e CDR dos equipamentos do LCI, segundo a norma NCRP 49 (1976) em seu apêndice C. O conhecimento destes valores é importante para a utilização da regra das duas fontes.

Tabela 5.9- Dimensionamento dos CSR e CDR dos equipamentos de raios X (NCRP 49, 1976)

Equipamento	Tensão (kV)	CSR Pb (mm)	CDR Pb (mm)	CSR Concreto (cm)	CDR Concreto (cm)
Raios X1	60	0,20	0,62	1,04	3,60
	125	0,28	0,93	2,0	6,6
Raios X2	220	0,60	1,91	2,31	7,70
	160	0,34	1,07	2,28	7,5
Raios X3	320	1,67	5,80	3,1	10,50

Com os valores de K_{ux} , foram utilizados os gráficos do apêndice D da norma NCRP 49, (1976) e foram determinadas as espessuras de blindagem de chumbo e de concreto.

Como há duas intensidades de radiação na mesma parede (fuga e espalhamento) deve-se fazer uma análise segundo a regra das duas fontes (NCRP, 1976):

a) Se a diferença entre as espessuras das duas barreiras for maior que 1 CDR, adota-se a de maior espessura;

b) Se a diferença entre as duas barreiras for pequena, ou seja, menor que 1 CSR , adiciona-se 1 CSR à maior delas.

Com os valores de K_{ux} , para a radiação de espalhamento e de fuga (Tabelas 5.7 e 5.8), e utilizando-se a regra das duas fontes, foi obtido o dimensionamento final das barreiras secundárias com as espessuras necessárias de blindagem em concreto e chumbo, apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Dimensionamento final das barreiras secundárias

Laboratório de Raios X 1					
Equipamentos 60 e 125 kV					
Parede P-01 Blindagem		Parede P-02 Blindagem		Parede P-07 Blindagem	
Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)
1,0	3,8	1,9	4,7	5,2	12,5

Laboratório de Raios X 2					
Equipamentos 220 e 160 kV					
Parede P-08 Blindagem		Parede P-09 Blindagem		Parede P-10 Blindagem	
Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)
2,0	6,5	1,7	4,6	2,1	6,7

Laboratório de Raios X 3					
Equipamento 320 kV					
Parede P-05 Blindagem		Parede P-06 Blindagem		Parede P-07 Blindagem	
Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)	Chumbo (mm)	Concreto (cm)
4,6	11,1	2,9	5,5	5,2	12,5

Pode-se observar que a maior espessura de blindagem para a radiação de espalhamento e de fuga ocorre na parede P-07 do Laboratório do Raios X 3, devido à maior tensão de trabalho (320 kV) e também pelo fato de fazer divisa com o Laboratório de Raios X1, recebendo feixes de radiação de ambos os lados e a blindagem final é de 5,2 mm de chumbo ou 12,5 cm de concreto..

5.8.3 –Análise comparativa dos custos por m² das blindagens de concreto e chumbo.

A maior espessura de blindagem será necessária na parede P-04, que mostrou a necessidade de uma blindagem de 7,1 mm de chumbo ou 25 cm de concreto.

Tem-se os seguintes valores por m²:

Concreto com espessura de 25 cm; o valor do m² é de R\$ 150,00 (Construtora MJ Almeida Ltda.)

Chumbo com espessura de 7,1 mm; o valor do m² é de R\$ 1.548,00 (Aurin Blindagens Radiológicas Ltda.).

Conclui-se que para o mesmo nível de blindagem, o chumbo possui um custo 10 vezes maior que o do concreto.

5.9 Orçamento preliminar da obra

A obra foi orçada pela Construtora MJ Almeida Ltda., computando-se todo o material necessário, projetos, documentações legais, mão de obra, hidráulica, elétrica, cobertura, piso, janelas portas, etc. Neste caso o orçamento incluiu a blindagem de concreto.

A construção do Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN, pode ser realizado em duas etapas. Na Figura 5.13 pode ser observado na legenda a área referente à etapa A e a etapa B.

VALORES FINAIS

Construção Total: R\$ 1.240.327,60

Construção Etapa A (laboratórios e sala de controle):R\$ 510.171,05

Construção Etapa B (o restante da obra): R\$ 730.156,55

Figura 5.13

6. CONCLUSÕES

1. O projeto desenvolvido, neste trabalho, do Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos, apresenta apenas uma sala de controle, onde todas as técnicas estarão integradas, possibilitando uma melhor integração quanto ao serviço de calibração. Os laboratórios com radiações X, alfa e beta ficarão no andar superior e as de radiação gama continuarão no andar inferior (Bunker).
2. A definição da localização dos laboratórios nos fundos do terreno oferece maior segurança para os funcionários e o público em geral. A disposição das salas de estudo para os funcionários e bolsistas, da sala de reuniões, sanitários, etc., foi definida colhendo-se informações das necessidades físicas e operacionais das atividades.
3. Para os cálculos das blindagens dos laboratórios, levou-se em conta a operação de cada equipamento de radiação, computando-se o seu tempo de utilização anual. A maior blindagem será necessária na parede P-04 do Laboratório do Raios X 3, devido a sua maior tensão de trabalho (320 kV). A utilização do concreto como barreira física foi a melhor solução encontrada, visto o chumbo apresentar um custo de 10 vezes maior que o concreto para a mesma proteção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Medidores e Monitores Portáteis de Taxa de Exposição de Raios X e Gama, para Uso em Radioproteção**, ABNT, Rio de Janeiro, 1987. (NBR 10011)

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração**, ABNT, Rio de Janeiro, 2005. (NBR ISO/IEC 17025)

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Iluminância de Interiores**, ABNT, Rio de Janeiro, 1992. (NBR 5413)

ANSI-AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **Specification of portable X- or Gamma - Radiation Survey Instruments**. ANSI, New York, 1977. (ANSI no. 13.4C.2)

ANSI-AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration, Portable Survey Instruments**, ANSI, New York, 1997. (ANSI no. 323A)

ARCHER, B.R. History of the Shielding of Medical X-Ray Imaging Facilities. **Health Physics**, v. 69, n. 5, p. 750-758, 1995.

ARCHER, B.R. Recent History of the Shielding of Medical X-Ray Imaging Facilities. **Health Physics**, v 88, n. 6, p. 579-586, 2005.

CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Serviços de Radioproteção**, NE-3.02. Resolução CNEN 12/88, agosto de 1988 (CNEN NE 3.02)

CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica** –NN-3.01. Diário Oficial da União de 26 de janeiro de 2005. (CNEN NN 3.01)

CEMBER, H. **Introduction to Health Physics**. Third edition, USA: Pergamon Press, p. 418-462, 1996.

CNS-CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE. Resolução nº 6, de 1988. **Normas Técnicas Gerais sobre o Sistema Nacional de Vigilância Sanitária**. Brasília, DF. 1988. (CNS Resolução nº6)

COSTA, P. R. **Modelo para Determinação de Espessuras de Barreiras Protetoras em Salas para Radiologia Diagnóstica**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo. (1999)

COSTA, P.R; NERISSIAN, D.Y.; SALVADOR, F.C.; RIO, P.B.; CALDAS, L.V.E. Generation of Calibrated Tungsten Target X-Ray Spectra: Modified TBC Model. - **Health Physics Society**, v.92, n. 1, p.24-32, 2007.

DIXON, R.L.; SIMPKIN, D.J. Primary Shielding Barriers for Diagnostic Radiology. Facilities: A New Model. **Health Physics**, v. 74, n. 2, p. 181-189, 1998.

DIXON, R.L; GRAY, J.E.; ARCHER, B.R; SIMPKIN, D. J. Radiation Protection Standards: Their Evolution from Science to Philosophy. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 115, n. 1-4, p. 16-22, part 1, 2005.

FONDEVILA, D; ARBISER, S; SANSOGNE, R; BRUNETTO, M; DOSARETZ, B. Maximum Dose Angle for Oblique Incidence on Primary Beam Protective Barriers in the Design of Medical Radiation Therapy Facilities, **Medical Physics**, v. 35, n. 5, p. 1816-1819, 2008.

HSE-HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **The Examination and Testing of Portable Radiation Instruments for External Radiations**, London, 1990 (Technical report series – TRS no. 49)

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments***, Vienna, 2000. (Safety reports series, SRS no. 16)

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities***. Vienna, 2006. (Safety reports series, ISSN 1020–6450 ; SRS no. 47)

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy***. Vienna, 1994. (Technical Reports Series, TRS no 374)

ICRP-INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***, ICRP Report 26, ICRP Publications. Elmsford, NY, Pergamon Press, 1977. (ICRP 26).

ICRP-INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***. ICRP Report 55, ICRP Publications, Oxford, Pergamon Press, 1989. (ICRP 55).

ICRP-INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***, ICRP Report 60, ICRP Publications. Elmsford, Pergamon Press, 1990 (ICRP 60).

IEC-INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***Portable X and Gamma Radiation Exposure Rate Meters and Monitors for Use in Radiological Protection***. Geneva, 1972 (IEC 395)

KÜNZEL, R; LEVENHAGENA, R.S; TERINI, R.A.; COSTA, P.R. X-Ray Spectroscopy Applied to Radiation Shielding Calculation in Mammography. - ***Medical Physics***,v. 35,n. 8, 2008.

MSSVS-MINISTÉRIO DA SAÚDE, SECRETARIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Portaria 453. Diretrizes de Proteção Radiológica e Radiodiagnóstico Médico e Odontológico.** Brasília:, Ministério da Saúde, 1998. (MSSVS 453)

MSSVS-MINISTÉRIO DA SAÚDE, SECRETARIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Regulamento Técnico para Planejamento, Programação, Elaboração e Avaliação de Projetos Físicos de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde.** Brasília, 2002 (Resolução – RDC Nº 50)

MTE-MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **28 Normas Regulamentadoras,** Lei nº 6.514 de 22 de dezembro de 1977, Brasília

MTE-MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **28 Normas Regulamentadoras,** Portaria 3.214, de 08 de junho de 1978, Brasília

NCRP-NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). **Structural Shielding and Evolution for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV.** NCRP Publications, Bethesda, MD, 1976 (NCRP 49)

NCRP-NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). **Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities.** NCRP Publications, Bethesda, MD, 2004 (NCRP 147)

NPL-NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. **The Examination, Testing & Calibration of Portable Radiation Protection Instruments.** NPL, 1999. (GPG no. 14)

PEDROSA, P. S.; GAVAZZA, S. ; BELLIDO, L. F. Uma Proposta para o Cálculo da Blindagem da Porta e da Parede Externa do Labirinto da Sala de Radioterapia Médica. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 17, n. 2, p 38- 43, 2004

SALINAS, I. C. ***Determinação dos Fatores de Blindagem para Construções Tipicamente Brasileiras***. Rio de Janeiro, 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SCAFF, L. ***Bases Físicas da Radiologia: Diagnóstico e Terapia***. São Paulo: Sarvier, 1979.

SIMPKIN, D.J. Evaluation of NCRP Report No 49 Assumptions on Workloads and Use Factors in Diagnostic Radiology Facilities. ***Medical Physics***, v. 23, n. 4, p. 577-584, 1996.

SIMPKIN, D.J.; DIXON, R.L. Secondary Shielding Barriers for Diagnostic X-Ray Facilities: Scatter and Leakage Revisited. ***Health Physics***, v. 74, n.3, p. 350 –365, 1998.

VIVOLO, V. ***Aplicação de Metodologia de Testes de Desempenho para Monitores Portáteis de Radiação***. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.

ANEXO: Planilha Orçamentária para a Ampliação do Laboratório de Calibração de Intrumentos

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA

Item	Discriminação	Quantidade	Unid	Valor unitário	Valor total
1	PROJETOS E CONSULTORIAS				41.300,00
1.1	Sondagens	1,00	vb	1.700,00	1.700,00
1.2	Projeto e consultoria de fundações	1,00	vb	5.000,00	5.000,00
1.3	Projeto estrutural	1,00	vb	7.000,00	7.000,00
1.4	Projeto arquitetônico	1,00	vb	5.200,00	5.200,00
1.5	Projeto de instalações elétricas e hidráulicas	1,00	vb	5.000,00	5.000,00
1.6	Projeto de instalações especiais	1,00	vb	6.500,00	6.500,00
1.7	Taxas e emolumentos	1,00	vb	9.700,00	9.700,00
1.8	Cópias e serviços gráficos	1,00	vb	1.200,00	1.200,00
2	SERVIÇOS PRELIMINARES				33.870,00
2.1	Limpeza do terreno	1,00	vb	1.300,00	1.300,00
2.2	Movimento de terra - Corte e aterro sem bota-fora	1.638,00	m³	15,00	24.570,00
2.3	Marcação de obra	1,00	vb	2.700,00	2.700,00
2.4	Tapumes e fechamentos	1,00	vb	5.300,00	5.300,00
3	CANTEIRO DE OBRAS E LOGÍSTICA				70.000,00
3.1	Instalações provisórias	1,00	vb	17.500,00	17.500,00
3.2	Locação de escoramentos	5,00	mês	2.900,00	14.500,00
3.3	Locação de equipamentos	1,00	vb	8.000,00	8.000,00
3.4	Retirada de entulho	40,00	vg	250,00	10.000,00
3.5	Controle ambiental e de segurança do trabalho	8,00	mês	500,00	4.000,00
3.6	Despesas com concessionárias	1,00	vb	16.000,00	16.000,00
4	INFRAESTRUTURA				149.673,20
4.1	Mão de obra para execução de brocas d=25cm c=3,50m	42,00	unid	105,00	4.410,00
4.2	Aço CA-50 para brocas	504,00	kg	3,30	1.663,20
4.3	Concreto fck 20 MPa convencional - brocas	7,50	m³	210,00	1.575,00
4.4	Mão de obra para execução de radier armado	250,00	m³	150,00	37.500,00
4.5	Aço CA-50 para radier	18.500,00	kg	3,30	61.050,00
4.6	Concreto fck 20 MPa bombeável - radier	185,00	m³	235,00	43.475,00
5	SUPERESTRUTURA				280.295,00
5.1	Blocos de concreto estrutural 14x19x39	21.600,00	unid	2,30	49.680,00
5.2	Mão de obra para execução de alvenaria estrutural	1.728,00	m²	17,00	29.376,00
5.3	Massa pronta para assentamento	520,00	sc	19,00	9.880,00
5.4	Aço Ca-50 para pilaretes e canaletas	1.400,00	kg	3,30	4.620,00
5.5	Graute	280,00	sc	350,00	98.000,00
5.6	Laje pré moldada com EPS	1.225,00	m²	17,00	20.825,00
5.7	Aço CA-50 para armação do capeamento	5.880,00	kg	3,30	19.404,00
5.8	Concreto fck 20 MPa - bombeável	98,00	m³	235,00	23.030,00
5.9	Mão de obra para execução da laje de cobertura	98,00	m³	260,00	25.480,00
6	COBERTURAS				75.975,00
6.1	Mão de obra para execução de telhado	1.225,00	m²	15,00	18.375,00
6.2	Madeiramento	1,00	vb	27.000,00	27.000,00
6.3	Kalhetão 90	450,00	unid	68,00	30.600,00
7	INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS				32.797,00
7.1	Materiais hidráulicos	1,00	vb	8.000,00	8.000,00
7.2	Mão de obra para execução de instalações hidráulicas	1,00	vb	7.500,00	7.500,00
7.3	Bacia sanitária com caixa acoplada	10,00	unid	750,00	7.500,00
7.4	Conjunto de metais para bacia sanitária	10,00	cj	48,00	480,00

7.5	Cubas de louça de embutir	6,00	unid	82,00	492,00
7.6	Conjunto de metais para lavatório	6,00	cj	270,00	1.620,00
7.7	Cuba dupla de inox	1,00	unid	225,00	225,00
7.8	Conjunto de metais para pia da copa	1,00	cj	480,00	480,00
7.9	Tampos em granito	1,00	vb	6.500,00	6.500,00
8	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS				78.750,00
8.1	Materias elétricos	1,00	vb	46.250,00	46.250,00
8.2	Mão de obra para execução de instalações elétricas	1,00	vb	32.500,00	32.500,00
9	ESQUADRIAS				77.050,00
9.1	Janela em alumínio com vidros 3,00x2,00	6,00	unid	2.250,00	13.500,00
9.2	Janela em alumínio com vidros 3,00x1,00	2,00	unid	1.125,00	2.250,00
9.3	Janela em alumínio com vidros	1,00	unid	850,00	850,00
9.4	Janela em alumínio com vidros 2,50x2,00	10,00	unid	1.875,00	18.750,00
9.5	Mão de obra para instalação de esquadrias de alumínio	1,00	vb	20.000,00	20.000,00
9.6	Conjunto de porta de madeira com 1 folha + ferragens	20,00	cj	290,00	5.800,00
9.7	Conjunto de porta de madeira com 2 folhas + ferragens	4,00	cj	425,00	1.700,00
9.8	Mão de obra para instalação de esquadrias de madeira	1,00	vb	5.000,00	5.000,00
9.9	Conjunto de portas duplas especiais	5,00	cj	1.500,00	7.500,00
9.10	Mão de obra para instalação de portas especiais	1,00	vb	1.700,00	1.700,00
10	ACABAMENTOS				202.724,00
10.1	Mão de obra para execução de chapisco e emboço	3.456,00	m²	14,00	48.384,00
10.2	Massa pronta para revetimento	1.200,00	sc	19,00	22.800,00
10.3	Mão de obra para colocação de cerâmica em paredes	160,00	m²	19,00	3.040,00
10.4	Cerâmica 20x30	160,00	m²	25,00	4.000,00
10.5	Massa para assentamento e rejuntamento de cerâmicas	32,00	sc	23,00	736,00
10.6	Mão de obra para colocação de cerâmica em pisos	60,00	m²	19,00	1.140,00
10.7	Cerâmica 30x30	60,00	m²	25,00	1.500,00
10.8	Massa para assentamento e rejuntamento de cerâmicas	12,00	sc	27,00	324,00
10.9	Granilite - material+mão de obra	1.100,00	m²	48,00	52.800,00
10.10	Materiais para pintura	1,00	vb	32.000,00	32.000,00
10.11	Mão de obra para pintura	3.000,00	m²	12,00	36.000,00
11	REVESTIMENTOS ESPECIAIS				
11.1	Paredes em Concreto – Blindagem dos Laboratórios-Acabadas	52,00	m²	450,00	23.400,00
12	COMPLEMENTAÇÃO DA OBRA				27.500,00
12.1	Proteção contra incêndio	1,00	vb	8.000,00	8.000,00
12.2	Telefonia e comunicações	1,00	vb	7.000,00	7.000,00
12.3	Paisagismo e jardins	1,00	vb	3.000,00	3.000,00
12.4	Sistemas de segurança	1,00	vb	4.500,00	4.500,00
12.5	Limpeza final	1,00	vb	5.000,00	5.000,00
13	DESPESAS ADMINISTRATIVAS DE CONSTRUÇÃO				146.993,42
13.1	Fiscalização técnica	8,00	mês	5.000,00	40.000,00
13.2	Taxa de administração da construtora	10,00	%	1.069.934,20	106.993,42
SUBTOTAL (SEM O ITEM 13)					1.093.334,20
TOTAL DA OBRA					1.240.327,60
OPÇÃO DE EXECUÇÃO APENAS FORA DA PROJEÇÃO DO BUNKER					510.171,05

Figura 5.1 – Foto do terreno onde será construído o novo LCI -Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos do IPEN

Figura 5.2 - Foto do local com a projeção do Bunker e a área de intervenção do projeto

Figura 5.3 - Planta planialtimétrica com as construções existentes e extensão futura do galpão de estocagem de rejeito radioativo

Figura 5.4 - Planta da Divisão de Radiobiologia - 1971

Figura 5.5 - Planta dos Laboratórios de Calibração de Instrumentos - 2008

- As partes hachuriadas representam os laboratórios e salas de estudo de outros grupos da GMR- IPEN

Figura 5.6 - Projeção do Bunker, com indicação dos pontos de medição para os Levantamentos Radiométricos

Figura 5.7 - Planta do projeto do novo Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos

Figura 5.8a-Vista da rampa de acesso para o Laboratório e o Bunker

Figura 5.8b-Vista Superior do Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos

Figura 5.9a- Perspectiva do Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos, detalhe da distribuição interna.

Figura 5.9b-Perspectiva do Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos

Figura 5.10- Detalhe da Laje Tabuleiro, com a Visão do Bunker

Figura 5.11- Detalhe da Laje Tabuleiro e do Bunker

Figura 5.12 – Detalhes dos laboratórios de raios X