

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD

**André Alves Santiago
Caroline Schwartz da Silva
Fernando Breno da Silva Pinto**

Avaliação Radiológica de Medidor Nuclear de Densidade de Solo

**Rio de Janeiro
2012**

**André Alves Santiago
Caroline Schwartz da Silva
Fernando Breno da Silva Pinto**

Avaliação Radiológica de Medidor Nuclear de Densidade de Solo

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de Especialista em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas, pelo Programa de Pós-Graduação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, em parceria com a Agência Internacional de Energia Atômica.

Orientador: Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva – IRD/CNEN

Rio de Janeiro – Brasil
Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear
Coordenação de Pós-Graduação
Setembro de 2012

Santiago, André Alves; Silva, Caroline Schwartz da; Pinto, Fernando Breno da
Silva

Avaliação Radiológica de Medidor Nuclear de Densidade de Solo/
André Alves Santiago; Caroline Schwartz da Silva; Fernando Breno da Silva
Pinto. Rio de Janeiro: IRD, 2012

64 f.

Orientador: Francisco Cesar Augusto da Silva

Monografia (Lato-Sensu) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Referências bibliográficas: f. 54-65

1. Medidor Nuclear 2. Densímetro Nuclear. 3. Avaliação radiológica. 4.
Proteção radiológica. I. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. II.

Título

**André Alves Santiago
Caroline Schwartz da Silva
Fernando Breno da Silva Pinto**

Avaliação Radiológica de Medidor Nuclear de Densidade de Solo

Rio de Janeiro, 21 de Setembro de 2012.

Prof. Francisco Cesar Augusto da Silva

Prof.^a Isabel Cristina Carrasco

Prof. Jorge Alves de Paula Vargas

Prof. Marcelo Sekiguchi

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação do Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus por nos permitir chegar até aqui.

Agradecemos a todos os professores do IRD por nos auxiliarem nesta caminhada, concedendo-nos toda a dedicação, atenção e, por transmitirem seus conhecimentos da melhor forma possível.

Agradecemos, especialmente, ao nosso orientador Francisco Cesar, que assumiu a responsabilidade de nos tornar os melhores que pudéssemos ser, transmitindo de forma irrestrita seu conhecimento e, se dedicando a nós como filhos.

Agradecemos aos professores, Isabel Cristina Carrasco, Jorge Alves de Paula Vargas e Marcelo Sekiguchi, que dispuseram de seu tempo e aceitaram nos prestigiar com sua avaliação participando de nossa banca examinadora.

Agradecemos ao Sr. Bruno Almeida C. de Castro, titular da empresa Pattrol, que gentilmente aceitou nosso convite para revisar este trabalho, contribuindo enormemente para nosso aprendizado.

Agradecemos a coordenação do curso, principalmente ao prof. Aucyone Augusto da Silva e a Sra. Rosane Amaral, por se dedicarem em nos atender ao longo de todo este curso.

Agradecemos ao Prof. João Carlos Leocadio, chefe do laboratório de indústria, que cedeu seu espaço, equipamentos e todos os recursos disponíveis de forma a contribuir com este trabalho.

Agradecemos a todos os chefes dos laboratórios do IRD e a seus funcionários, por nos permitirem utilizar suas instalações e recursos ao longo de todo nosso trabalho.

Agradecemos aos nossos familiares e amigos, por todo o apoio e compreensão durante nossa ausência nos momentos de estudo (que foram tantos!).

Agradecemos aos nossos colegas do curso de Pós-Graduação do IRD/AIEA, que nos acompanharam nessa jornada e compartilharam nossas tensões durante este curso.

Nosso muito obrigado a todos!

RESUMO

Os medidores nucleares são uma ferramenta importantíssima para a indústria moderna. São equipamentos dotados de fontes de radiação ionizante e um detector e que, através da interação desta radiação com a matéria, geram um sinal que pode ser programado para executar uma série de funções. Os medidores nucleares se dividem em várias categorias, dentre elas os medidores nucleares de densidade. Estes equipamentos estão presentes em diversos segmentos industriais e em muitos controles de processos, tais como indústrias petroquímicas, de alimentos, agrícola, têxtil, de concreto, etc. Os medidores nucleares de densidade também possuem algumas aplicações específicas, dentre elas a dos medidores nucleares de densidade de solo. Trata-se de um aparelho capaz de determinar a densidade e a umidade presentes nos solos nus e em camadas de asfalto e concreto. Devido a sua enorme versatilidade estes equipamentos são cada vez mais utilizados, o que demanda um número cada vez maior de profissionais qualificados para operá-los. Hoje no Brasil existem 397 instalações autorizadas a utilizar medidores nucleares, situadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste. Segundo o órgão regulador no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), cada uma destas instalações deve contar com, no mínimo, um supervisor de proteção radiológica habilitado especificamente para medidores nucleares e um substituto. Desta forma este segmento ganha cada vez mais espaço e exige uma constante capacitação de profissionais voltados para esta área. Como a manipulação de equipamentos que utilizam a radiação ionizante requer uma série de cuidados adicionais, em especial no armazenamento, transporte e uso, são definidas diretrizes básicas de proteção radiológica conforme a Norma CNEN NN 3.01. Não obstante a estes cuidados, acidentes eventualmente ocorrem, trazendo uma série de prejuízos financeiros, materiais, aos indivíduos envolvidos, bem como ao meio ambiente. Estes acidentes são ocasionados principalmente pelo descuido quanto aos procedimentos de utilização e segurança. Visando aumentar a difusão dos critérios de segurança, realizamos uma avaliação radiológica no medidor nuclear de densidade de solo e desenvolvemos um setup para a realização de uma avaliação de contaminação (teste de esfregaço), item obrigatório nos testes periódicos de integridade da fonte de radiação deste tipo de aparelho. Com isso pretendemos contribuir para o aprendizado e para o uso seguro destes medidores.

Palavras chave: Medidores Nucleares. Radiação Ionizante. Densidade de Solo. Acidentes. Avaliação Radiológica. Avaliação de Contaminação.

ABSTRACT

The nuclear gauges are an important tool for modern industry. Equipments are provided with sources of ionizing radiation and a detector and that through the interaction of this radiation with matter, generate a signal that can be programmed to perform a variety of functions. The nuclear gauges are divided into several categories, among them nuclear density gauges. These equipments are present in many industrial and process controls in many industries such as petrochemicals, food, agriculture, textiles, concrete, etc. The nuclear density gauges also have some specific applications, among them nuclear density meters of soil. This is a device able to determine the density and the moisture present in the bare soil and asphalt layers and concrete. Due to its versatility these devices are increasingly used, which requires a growing number of professionals to operate them. Today in Brazil there are 397 facilities authorized to use nuclear gauges, located mainly in the South and Southeast. According to the regulator in Brazil, the National Commission of Nuclear Energy (CNEN), each of these facilities must have at least one supervisor enabled radiological protection and nuclear gauges specifically for a replacement. Thus this segment is gaining more space and requires constant training of professionals focused on this area. How handling equipment using ionizing radiation requires a lot of extra care, especially in the storage, transport and use, basic guidelines are defined radiological protection as standard CNEN NN 3.01. Despite these precautions, accidents may occur, bringing a series of financial losses, materials, to the individuals involved, as well as the environment. These accidents are mainly caused by carelessness in how to use and safety. Aiming to increase the dissemination of safety criteria, perform radiological assessments at nuclear density meter of soil and developed a setup to perform an assessment of contamination (smear test), in item mandatory periodic testing of the integrity of this radiation source device type. With this we intend to contribute to the learning and for the safe use of these meters.

Keywords: Nuclear Gauges. Ionizing Radiation. Density of Soil. Accidents. Radiological Assessment. Contamination Assessment.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVO	12
1.2.	JUSTIFICATIVA	12
2.	MEDIDORES NUCLEARES	13
2.1.	MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO	16
2.1.1.	TRANSMISSÃO DIRETA	17
2.1.2.	RETROESPALHAMENTO	18
2.1.3.	UMIDADE	19
2.2.	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	19
2.3.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E TÉCNICAS	24
2.4.	CATEGORIZAÇÃO DAS FONTES	25
2.5.	RISCO RADIOLÓGICO	27
2.6.	INVENTÁRIO DE MEDIDORES NUCLEARES NO BRASIL	28
2.7.	MONITORAÇÃO INDIVIDUAL	29
2.8.	NOVOS MODELOS DE MEDIDORES NUCLEARES DE DENSIDADE DE SOLO	30
3.	METODOLOGIA	32
3.1.	AVALIAÇÃO RADIOLÓGICA DO MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO EM LABORATÓRIO	33
3.2.	AVALIAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO	37
3.3.	AVALIAÇÃO RADIOLÓGICA DO MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO EM CAMPO	43
4.	ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE	52
5.	ACIDENTES OCORRIDOS	54
6.	CONCLUSÕES	58
7.	RECOMENDAÇÕES	59
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Exemplo de medidor nuclear fixo	13
FIGURA 2 – Esquema de medição por transmissão direta	14
FIGURA 3 – Esquema de medição por retroespalhamento	14
FIGURA 4 – Esquema de medição por reatividade	14
FIGURA 5 – Exemplo de medidor nuclear de densidade de solo e suas principais estruturas internas	16
FIGURA 6 – Exemplo de medição por transmissão direta	17
FIGURA 7 – Exemplo de medição por retroespalhamento	18
FIGURA 8 – Diagrama do efeito fotoelétrico	20
FIGURA 9 – Diagrama do efeito Compton	21
FIGURA 10 – Diagrama da produção de pares	21
FIGURA 11 – Diagrama do tubo Geiger-Muller	22
FIGURA 12 – Detectores Geiger-Muller. Grande variedade de formas e tamanhos	22
FIGURA 13 – Distribuição das empresas registradas para uso de medidores nucleares no Brasil	28
FIGURA 14 – Painel do medidor Troxler 3440 Plus	31
FIGURA 15 – Levantamento radiométrico para radiação gama. Medidas na superfície esquerda, acima e na alça, respectivamente	34
FIGURA 16 – Levantamento radiométrico para nêutrons na superfície e a 30 cm, respectivamente	34
FIGURA 17 – Monitor com detector gama e detalhe do detector beta	38
FIGURA 18 – Protótipo do amostrador para teste de esfregaço	38
FIGURA 19 – Medidor nuclear posicionado sobre bancada e verificação de segurança da fonte gama	39
FIGURA 20 – Posicionamento do jogo de espelhos e detalhe do canal da fonte, respectivamente	39
FIGURA 21 – Sequência de preparo do amostrador	40
FIGURA 22 – Abertura da blindagem e introdução do amostrador no canal da fonte	40
FIGURA 23 – Processo de esfregaço com constante monitoração da área	41
FIGURA 24 – Modelo da ficha de identificação da amostra	41
FIGURA 25 – Monitoração das amostras. Análise gama e beta, respectivamente	42
FIGURA 26 – Retirada da amostra presa no canal da fonte	42

FIGURA 27 – Monitoração da extremidade da pinça	43
FIGURA 28 – Representação das linhas de isolamento para a avaliação radiológica realizada em campo	44
FIGURA 29 – Isolamento da área e sinalização com o símbolo das radiações ionizantes	45
FIGURA 30 – Equipamento sob constante vigilância	46
FIGURA 31 – Medição da radiação de fundo, gama e nêutrons	46
FIGURA 32 – Bloco de calibração	47
FIGURA 33 – Calibração do medidor nuclear	47
FIGURA 34 – Preparação do local para transmissão direta	48
FIGURA 35 – Delimitação do gabarito de perfuração	48
FIGURA 36 – Sonda introduzida no solo para posição de transmissão direta	49
FIGURA 37 – Sonda no nível do solo para posição de retroespalhamento	49
FIGURA 38 – Avaliação radiológica para gama e nêutrons, respectivamente	50
FIGURA 39 – Medida de confirmação do recolhimento da fonte	51
FIGURA 40 – Representação do ocorrido no acidente do Reino Unido em 1994	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principal uso dos radionuclídeos em medidores na indústria	15
TABELA 2 – Características principais do densímetro Troxler	24
TABELA 3 – Classificação D conforme tecido/dose	25
TABELA 4 – Exemplos de valores D por radionuclídeos	25
TABELA 5 – Categorização de fontes	26
TABELA 6 – Quantidade de instalações autorizadas e tipos de medidores nucleares por região	28
TABELA 7 – Limites de dose para IOEs e Público	29
TABELA 8 – Dados dos medidores nucleares de densidade de solo utilizados	32
TABELA 9 – Relação dos monitores de radiação utilizados	33
TABELA 10 – Relação das sondas utilizadas em conjunto com os monitores de radiação	33
TABELA 11 – Limites de taxa de dose para radiação gama recomendados pelo fabricante	33
TABELA 12 – Limites de taxa de dose para radiação de nêutrons recomendados pelo fabricante	34
TABELA 13 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 1 para a fonte gama	35
TABELA 14 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 2 para a fonte gama	35
TABELA 15 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 3 para a fonte gama	35
TABELA 16 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 4 para a fonte gama	35
TABELA 17 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 1 para a fonte de nêutrons	36
TABELA 18 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 2 para a fonte de nêutrons	36
TABELA 19 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 3 para a fonte de nêutrons	36
TABELA 20 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 4 para a fonte de nêutrons	36
TABELA 21 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de transmissão direta para avaliação da radiação gama	44

TABELA 22 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de retroespalhamento para avaliação da radiação gama	45
TABELA 23 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de retroespalhamento para avaliação da radiação de nêutrons	45
TABELA 24 – Categorias de volumes e sobre-embalagens	53

1. INTRODUÇÃO

Os medidores nucleares são equipamentos simples, que permitem a aquisição de dados em tempo real e podem ser adaptados a diversos usos conforme a necessidade. Sua construção se baseia em uma fonte emissora de radiação ionizante (selada e de meia vida longa) e um receptor desta radiação. Este receptor geralmente fica acoplado a uma parte eletrônica responsável por ativar ou desativar um determinado comando. Atualmente, a maioria das indústrias conta, direta ou indiretamente, com os dados de medidores nucleares em suas atividades a fim de gerir seus processos.

Os densímetros nucleares, como também são conhecidos, estão presentes nos mais diversos ramos de atividade. Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, o Brasil possui hoje 397 instituições registradas e autorizadas a operar com tais equipamentos, que se distribuem principalmente em indústrias que necessitam de um grande controle de qualidade e acompanhamento constante em suas linhas de produção, tais como as indústrias petroquímica, alimentícia, têxtil, agrícola, cimentícia, automobilística, de celulose, aeronaval, etc. Dentre os principais usos podemos citar: medição de densidade em borrachas, tecidos, papéis, cimentos, produtos químicos e em líquidos em geral, medições de espessura em papel, vidro e chapas de aço, medições de umidade em cimentos e minerais e medições de nível em caldeiras e silos. (LOURENÇO, 2012)

Devido ao avanço das tecnologias empregadas em construção civil e industrial, envolvendo concreto e asfalto, a gestão da qualidade nos processos vem tomando cada vez mais espaço. Controlar a qualidade, desde as matérias primas até a finalização do projeto é uma tarefa que exige mão de obra especializada e equipamentos que permitam analisar as especificações solicitadas ainda durante o processo de construção. Dentre os diversos usos dos medidores nucleares neste segmento, temos a medição da densidade (massa/volume) e da umidade, que são importantes critérios adotados para determinar a qualidade de materiais e produtos.

Mediante esta demanda, o uso de medidores nucleares de densidade de solo e asfalto vem ganhando cada vez mais espaço no Brasil. Trata-se de um equipamento eletrônico, dotado de duas fontes emissoras de radiação ionizante (gama e nêutrons), capazes de determinar a densidade e a umidade das camadas de concreto e asfalto conforme vão sendo aplicadas. (DA SILVA, 2012b)

Outra aplicação destes densímetros é na determinação da densidade e da umidade dos solos nus ainda antes de receberem as camadas iniciais de concreto ou asfalto, de forma a darem uma visão clara sobre as características mecânicas do local da construção.

O funcionamento de tais aparelhos está baseado no princípio físico da atenuação da radiação conforme a variação da densidade do meio com o qual interagem. Desta forma, a radiação emitida pelas fontes é quantificada e a diferença em relação a radiação que chega aos detectores, presentes no corpo do aparelho, gera um coeficiente que é interpretado pelo software do densímetro e que caracteriza um valor de densidade/umidade.

O densímetro nuclear pode operar, basicamente, de duas formas distintas, de acordo com a necessidade, sendo elas: retroespalhamento e transmissão direta. Pelo método de retroespalhamento, tanto a fonte de radiação quanto o detector que

a quantifica ficam no nível do solo, assim apenas a radiação que é retroespalhada pelo solo é captada e processada pelo aparelho. O outro método é o de transmissão direta, nele a fonte de radiação (gama), que fica na extremidade de uma haste (sonda) que integra o densímetro, é introduzida no solo através de um furo previamente feito e a radiação é transmitida de acordo com profundidades pré-determinadas pelo operador até serem captadas pelo detector na base do aparelho, determinando assim a densidade naquela camada específica. (TROXLER, 2012a)

Como se trata de um equipamento que utiliza fontes de radiação ionizante, seu uso requer profissionais treinados e qualificados, conhecedores das normas de segurança e radioproteção vigentes. Além disso, é necessário fazer um acompanhamento constante dos níveis de radiação emitidos pelo densímetro e seu raio de alcance de forma a controlar os níveis de dose e se certificar que os limites sejam respeitados garantindo a segurança, tanto dos trabalhadores quanto do público em geral e ainda do meio ambiente.

A segurança do aparelho também é um fator importante a ser considerado. Garantir sua integridade desde a saída para a operação através da restrição ao seu acesso, da sinalização do equipamento e do veículo utilizado para transporte, do isolamento de área adequado, etc. até seu retorno em segurança, são fundamentais para a radioproteção. A realização de testes periódicos, que avaliam a integridade das fontes radioativas (teste de esfregaço), também são obrigatórios e fazem parte de uma série de requisitos que devem ser observados.

Como o controle e uso de tais equipamentos é feito por pessoal qualificado, os acidentes ocorridos são poucos, entretanto eles existem e suas consequências podem ser graves caso não haja a tomada de decisões acertadas para sua mitigação. A principal causa dos acidentes/incidentes relatados é a falta de atenção quanto às regras de uso e o excesso de confiança adquiridos por alguns profissionais ao longo do tempo. As principais consequências são a perda de tempo, devido à parada nas operações da construção enquanto o resgate da fonte é conduzido, e a inutilização do aparelho, em ambos os casos são gerados enormes prejuízos. (TROXLER, 2012a)

Devido ao grande uso deste equipamento e de sua importância nos processos de construção, no Brasil, a regulamentação para o uso do densímetro nuclear, incluindo o licenciamento das empresas que podem utilizá-lo, é feito pela CNEN que, apesar de não possuir uma regulamentação específica para medidores nucleares, através de suas normas gerais e regulamentos específicos, determina ações e procedimentos a serem adotados. Como exemplo citamos a Norma CNEN NN 3.01 que dita as diretrizes básicas de proteção radiológica, a Resolução CNEN N°112 Norma que trata do licenciamento de Instalações radiativas, a Norma CNEN NE 5.01 que trata do Transporte de Materiais Radioativos e, ainda, a Norma CNEN NE 3.02 que aborda os Serviços de Radioproteção.

É tamanha a importância dos densímetros nucleares para o desenvolvimento de um país, que os EUA criaram uma associação exclusiva para este equipamento, a American Portable Nuclear Gauge Association - APNGA, onde os objetivos principais são descrever os procedimentos de segurança básicos para seu uso, informar sobre os riscos do uso inconsciente da radiação ionizante e troca de informações sobre novas técnicas e formas de uso deste equipamento. (APNGA, 2012)

1.1. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma avaliação radiológica em um medidor nuclear de densidade de solo, especificando o risco radiológico para o uso no campo, a categorização das fontes radioativas usadas, o inventário desses medidores no Brasil, os procedimentos de proteção radiológica e de segurança a serem seguidos, de acordo com as normas em vigor e, os acidentes ocorridos na utilização do mesmo.

Como objetivo secundário, planejamos elaborar um setup de demonstração para um teste de esfregação, que é um requisito obrigatório nos testes de controle de qualidade do medidor nuclear de densidade de solo.

1.2. JUSTIFICATIVA

Estes equipamentos usam dois tipos de fontes radioativas: ^{137}Cs , fonte gama, com atividades de, aproximadamente 0,37 GBq (10 mCi) e $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$, fonte de nêutrons com, aproximadamente 2,22 GBq (60 mCi). São equipamentos portáteis e normalmente usados para medir densidade e umidade em solo e materiais de construção.

Um estudo radiológico detalhado deve ser realizado para se obter uma prática segura do uso desse equipamento, tanto para os indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público, como para o meio ambiente, evitando-se, assim, possíveis acidentes radiológicos que podem causar prejuízos pessoais, econômicos e sociais para os envolvidos e para o meio ambiente.

A elaboração de um setup de demonstração do teste de esfregação no medidor nuclear de densidade de solo contribuirá enormemente para o aprendizado de futuros técnicos e supervisores de radioproteção na área de indústria radiativa.

2. MEDIDORES NUCLEARES

Os medidores nucleares são equipamentos largamente usados nos mais diversos setores. Atualmente no Brasil há o registro de 397 instalações autorizadas, segundo a CNEN, sendo: 18 na região norte, 60 na região nordeste, 22 na região centro-oeste, 226 na região sudeste e 71 na região sul. (CNEN, 2012e)

Os medidores nucleares são compostos, basicamente, por uma fonte de radiação ionizante e um detector, entre os quais se interpõem algum tipo de material e, devido a atenuação da radiação por este meio material ou por sua reflexão, conforme o caso, é gerada uma diferença entre a taxa de radiação emitida e a registrada. Com isso, é possível programar um componente eletrônico para executar alguma tarefa específica conforme a atenuação da radiação registrada.

As fontes de radiação ionizante utilizadas nestes equipamentos são devidamente seladas, evitando o risco de contaminação, entretanto, devido à natureza destas radiações, que são altamente penetrantes (gama e nêutrons), há o grande risco de se sofrer irradiação caso não sejam observadas as normas de segurança. Há ainda os medidores nucleares que operam com fontes emissoras de radiação beta, esta não é tão penetrante como as citadas, porém também é igualmente danosa devido ao seu alto poder de ionização e alto LET (transferência linear de energia). (LOURENÇO, 2012)

Os medidores nucleares são divididos em duas categorias principais, os fixos (FIGURA 1) e os portáteis e, os princípios básicos de funcionamento em ambos são: transmissão direta, retroespalhamento e reatividade.



FIGURA 1 – Exemplo de medidor nuclear fixo.
(Fonte: www.noldor.com.ar, 2012)

No método de transmissão direta (FIGURA 2) a fonte fica no lado oposto ao do detector, assim a radiação ionizante atravessa o material avaliado. No método de retroespalhamento (FIGURA 3), tanto a fonte quanto o detector ficam no mesmo lado e a medição se dá pela reflexão da radiação no meio avaliado. A técnica de reatividade (FIGURA 4) é utilizada quando o meio avaliado, ao interagir com um tipo específico de radiação (gama ou nêutrons), reage gerando outro tipo de radiação (geralmente X), caracterizando este meio.

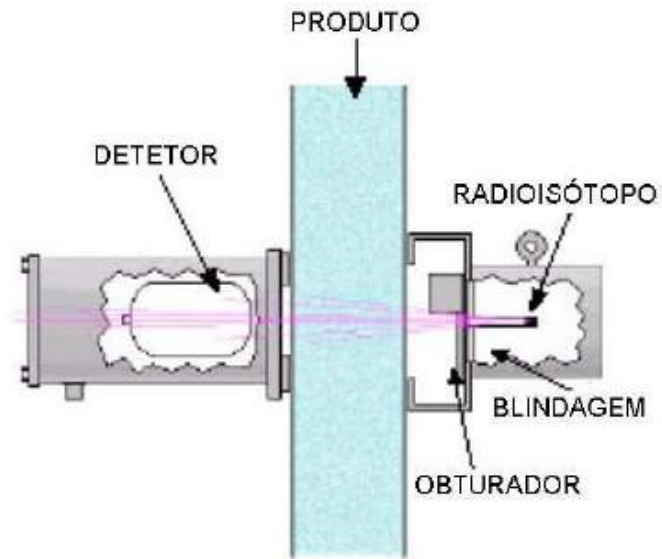


FIGURA 2 – Esquema de medição por transmissão direta.
(Fonte: www.lucianosantarita.pro.br, 2012)



FIGURA 3 – Esquema de medição por retroespalhamento.
(Fonte: www.lucianosantarita.pro.br, 2012)

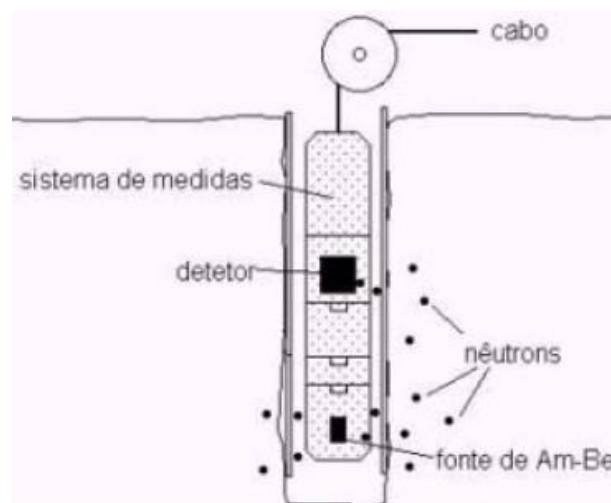


FIGURA 4 – Esquema de medição por reatividade.
(Fonte: www.lucianosantarita.pro.br, 2012)

Esses medidores são largamente utilizados em diversas indústrias, participando de controles de processos e em linhas de produção. Como exemplo podemos citar:

- **Medidores Nucleares de Nível** – São usados em silos de armazenamento de produtos diversos e em caldeiras, bem como em indústrias onde as linhas de produção possuem um alto fluxo de produtos, como a de bebidas. Utilizam principalmente fontes gama e X de alta energia (silos e caldeiras) ou beta (em bebidas; devido a natureza desta radiação suas fontes são eletrodepositadas). Eles são responsáveis por controlar os níveis mínimo e máximo, permitindo controlar a quantidade de matérias primas e outros insumos sem a necessidade da presença física de um operador em locais de difícil acesso ou insalubres.
- **Medidores Nucleares de Espessura** – São utilizados em diversas indústrias que necessitam controlar a espessura de seus produtos, por exemplo, em indústrias de celulose (para medir a espessura dos papéis e papelões) e siderúrgicas (para medir a espessura das chapas de aço. Utilizam principalmente fontes beta e gama/X de alta energia, respectivamente.
- **Medidores Nucleares de Umidade** – São utilizados em indústrias que necessitam controlar a umidade, tanto em seus insumos e matérias primas quanto em seus produtos finais. Utilizam basicamente fontes de nêutrons. Como exemplos, podemos citar indústrias que utilizam cimento, minérios e vidros.
- **Medidores Nucleares de Densidade** – São utilizados em indústrias com necessidade de controlar a densidade de seus insumos e matérias primas. Utilizam principalmente fontes gama e X de alta energia. São muito utilizados em indústrias de borracha, cimento, lama, líquidos em geral, alimentos, produtos químicos, tecidos, celulose, etc. (LOURENÇO, 2012)

Muitas indústrias ainda combinam as funções de mais de um tipo de medidor a fim de tirar o maior proveito possível desta tecnologia. Na TABELA 1 estão relacionados os principais tipos de radionuclídeos utilizados e suas respectivas características e aplicações.

TABELA 1 – Principal uso dos radionuclídeos em medidores na indústria.

Radionuclídeo	Tipo de Radiação	T ^{1/2}	Energia Média	Aplicação
Promécio (¹⁴⁷ Pm)	β	2,6 anos	62 keV	Densidade e espessura em papéis Revestimentos finos de metal
Tálio (²⁰⁴ Tl)	β	3,8 anos	244 keV	Espessuras em papel, borrachas e tecidos
Kriptônio (⁸⁵ K)	β	10,7 anos	251 keV	Espessura de papelões
Estrôncio (⁹⁰ Sr)	β	28,6 anos	196 keV	Espessura de metais finos, plásticos, borrachas e vidros
Ítrio (⁹⁰ Y)	β	64 horas	935 keV	Conteúdo de pacotes/maços de cigarros
Raios X	X	Não se aplica	Variável	Espessuras em aço (até 20 mm)
Americio (²⁴¹ Am)	γ	432 anos	14 keV 59 keV	Nível de líquidos em latas/garrafas Espessuras em aço (até 10 mm), em vidro (até 10 mm) em plásticos (até 30 mm)

Césio (^{137}Cs)	γ	30,2 anos	662 keV	Espessuras em aço (até 100 mm) Conteúdo de oleodutos Espessuras em vidros (maiores que 20 mm) Densidade de minérios
Cobalto (^{60}Co)	γ	5,3 anos	1,25 MeV	Espessuras em aço (até 100 mm) Conteúdo de fornos de coque e olarias
Americio/Berílio ($^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$)	Nêutrons rápidos	432 anos	4 MeV	Detecção de hidrocarbonetos em rochas Níveis de hidrocarbonetos em tanques de armazenamento

Fonte: (LOURENÇO, 2012)

2.1. MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO

O medidor nuclear de densidade de solo, ou densímetro nuclear (FIGURA 5), é um equipamento eletrônico que possui uma sonda dotada de uma fonte radioativa e que, a partir de emissões de raios gama, determina o grau de compactação de solos (densidade). Também possui uma fonte de nêutrons, fixa em sua base, que permite mensurar o grau de umidade presente nos materiais avaliados. Este equipamento é composto por duas fontes radioativas, sendo uma de Césio (^{137}Cs , emissor gama) e outra composta de Americio/Berílio ($^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$, emissora de nêutrons), e de dois detectores, para medição das radiações que retornam ao aparelho.

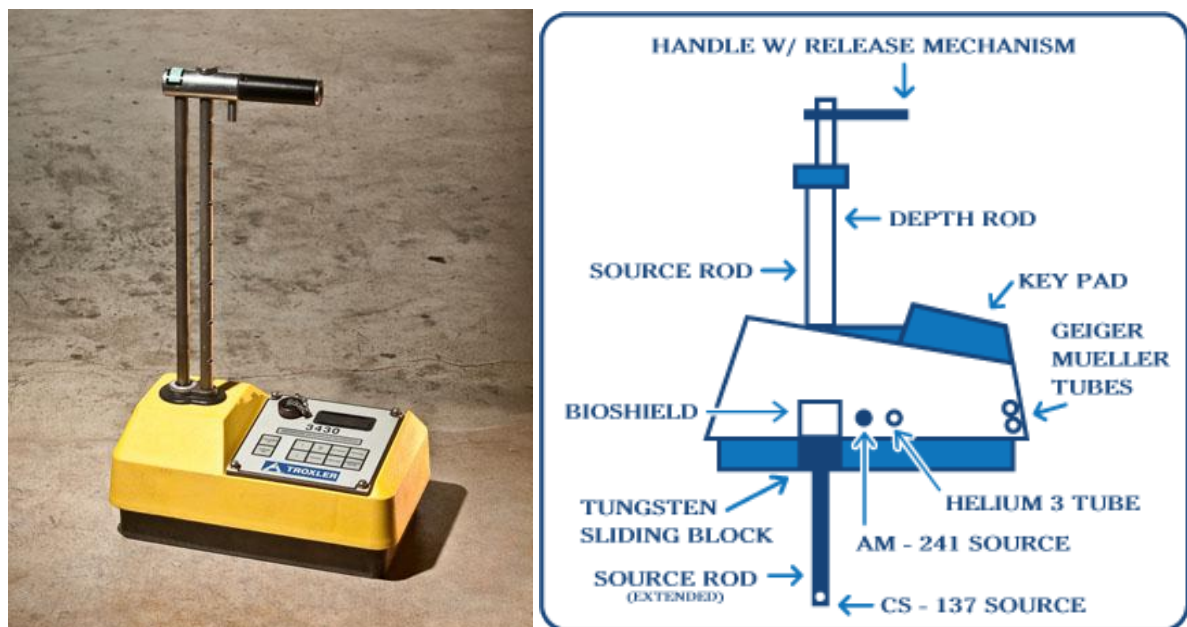


FIGURA 5 – Exemplo de medidor nuclear de densidade de solo e suas principais estruturas internas. (Fonte: www.pattrol.com.br, 2012)

A utilização dos densímetros nucleares na determinação de umidade e densidade de solos, desde o final da década de 50, tem crescido muito. Além disso, nos últimos anos, passou também a ser empregado com grande frequência na

determinação da densidade e umidade em diversas estruturas de concreto compactado com rolo (CCR), sendo um método de notória importância para a construção de barragens de concreto, na realização do controle de qualidade durante construções diversas, em usinas hidrelétricas, para avaliação de pavimentos rígidos, para a pesquisa tecnológica e avaliação das propriedades do solo e agregados.

Os resultados obtidos nas medições com este equipamento é rápido quando comparado a outros métodos (de 6 a 10 vezes mais rápido que as técnicas convencionais), podendo apresentar resultados em, aproximadamente, 1 minuto para ensaios em asfalto (tempo por ensaio), e 10 minutos para ensaios em concreto compactado (tempo por ensaio). Para aferições em solos diversos, o tempo de cada ensaio varia (cerca de 4 minutos por ensaio), pois demanda uma constante calibração no aparelho de acordo com tipo do solo a ser analisado com um padrão, o que confere uma maior precisão nos resultados. (PATROL, 2012)

2.1.1. TRANSMISSÃO DIRETA

Na posição de transmissão direta a haste do equipamento, onde se localiza a fonte radioativa de ^{137}Cs , estende-se através da base do medidor para dentro de um orifício previamente feito no solo, podendo chegar a até 30 cm de profundidade (de acordo com o modelo do aparelho) (FIGURA 6), as medições em camadas de concreto, asfalto e solos em geral são realizadas quando a profundidade total é maior do que 10 cm (4 polegadas).

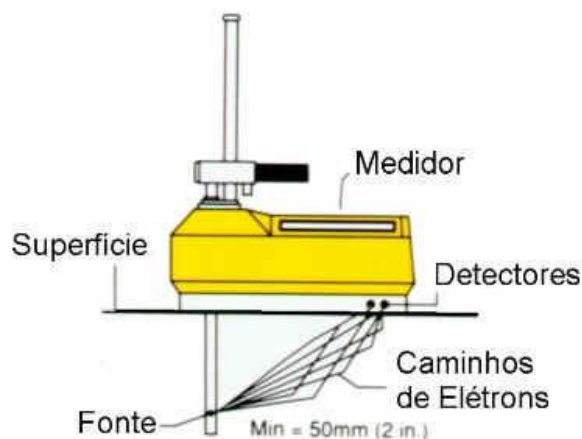


FIGURA 6 – Exemplo de medição por transmissão direta.
(Fonte: www.patrol.com.br, 2012)

Como o operador pode escolher a profundidade na qual a sonda gama vai operar para a medição da densidade, os erros devidos à rugosidade do material e sua composição química são reduzidos, com isso a precisão das medidas é aumentada. (PATROL, 2012)

Os raios gama são transmitidos a partir da fonte, através do material estudado e, são então coletados por um detector dentro do medidor, localizado em sua base. Desta forma a medida da densidade determinada pelo aparelho é a densidade média do material estudado, contida entre a fonte radioativa (ponta da haste) e a base do equipamento (detector). (TROXLER, 2012a)

Ao realizar ensaios de densidade em superfícies como: asfalto, partículas grossas, ou em misturas abertas graduadas, os espaços vazios na superfície devem ser preenchidos com areia macia, pó de cimento ou partículas nativas do próprio solo. No entanto, a superfície do solo deve permanecer exposta, de modo que toda a base do medidor faça contato com sua superfície.

O modo de medida em “solo”, característico de alguns modelos, é concebido para medições em terra, areia, agregado ou outros materiais, onde se deseja mensurar tanto a densidade quanto o teor de umidade em solos nus. Testes de transmissão direta geralmente oferecem maior precisão e controle de profundidade de medição e é o método preferido nestes casos.

No modo “solo”, o operador pode aplicar um fator de correção (umidade offset) para ajustar a presença de hidrogênio ligado quimicamente ou outros elementos absorvedores de nêutrons, que podem afetar a aferição da umidade. Por exemplo, a mica é um mineral que geralmente contém concentrações consideráveis de hidrogênio, o que fará com que as leituras indiquem um teor de umidade maior do que o real. (TROXLER, 2012a)

2.1.2. RETROESPALHAMENTO

No modo de retroespalhamento a fonte não é inserida no solo, ficando apenas em contato com ele e, no mesmo nível do detector. Os raios gama emitidos interagem com o meio material do solo e são retroespalhados, isto é, refletidos, em maior ou menor grau de acordo com a densidade do local, sendo então retroespalhados para os detectores e, então “contados”, o que permite a determinação da densidade do material, como representado na FIGURA 7.

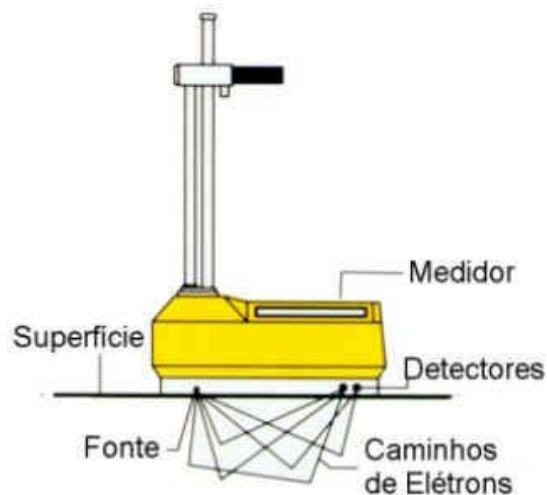


FIGURA 7 – Exemplo de medição por retroespalhamento.
(Fonte: www.pattrol.com.br, 2012)

Sua capacidade de medição é de aproximadamente 10 cm de profundidade (de acordo com o modelo do aparelho utilizado), sendo um método mais utilizado para determinar espessuras de camadas de asfalto sobrepostas e de CCR. (TROXLER, 2012a)

2.1.3. UMIDADE

O teor de umidade dos solos também é determinado em uma medição semelhante ao modo de retroespalhamento, sendo um ensaio não destrutivo com, tanto a fonte de nêutrons quanto seu detector, posicionados na superfície do material (fixos na base do aparelho).

Nêutrons “rápidos” são emitidos no material pela fonte de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ localizada na base do aparelho que, ao interagirem com a água (H_2O) presente no material, devido à alta seção de choque do hidrogênio (^1H), são “termalizados”, isto é, tem sua velocidade reduzida. A contagem dos nêutrons retroespalhados é feita, então, em um detector composto por um tubo de Hélio, que assim mede o teor de umidade do material através de seus índices de fluência. A variação na detecção desses nêutrons cria um coeficiente que é analisado pelo software do equipamento e, convertida em um valor representativo da umidade presente no material avaliado.

Seus resultados indicam valores para densidade “seca”, densidade “molhada”, umidade e percentual de umidade. (TROXLER, 2012a)

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento deste equipamento se baseia na absorção/atenuação da radiação pela matéria, através das suas interações com os átomos que a compõem. Quanto mais denso o material, maior o coeficiente de absorção/atenuação, conseqüentemente menos radiação chega ao detector.

Desta forma, a medição da densidade se faz através da emissão de raios gama por uma fonte radioativa (^{137}Cs). A radiação gama é “contada” por um detector após ter atravessado o material e, a diferença entre a radiação emitida e a captada, gera um coeficiente que é interpretado pelo aparelho e convertido em um valor de densidade correspondente. (MACEDO; PIRES e CORRECHEL, 2000)

Quando um feixe de raios gama monoenergéticos incide sobre um material absorvedor de densidade variável, observa-se a atenuação exponencial desses raios. Cada um dos processos de interação da radiação com a matéria remove fótons do feixe e pode ser caracterizado por uma probabilidade fixa de ocorrência por unidade de densidade do material absorvedor.

A soma das probabilidades de ocorrência desses processos de interação, ou seja, a probabilidade do fóton ser removido do feixe é chamada coeficiente linear de atenuação. Este coeficiente apresenta a desvantagem de variar com a densidade do

meio absorvedor. Assim, utiliza-se um coeficiente de atenuação mássico, onde se considera a densidade do meio absorvedor.

Há vários processos de interação da radiação gama com a matéria, sendo três os mais representativos para a detecção desta radiação: Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton e Produção de Pares. Todos esses processos de interação produzem uma transferência completa ou parcial da energia de um fóton para um elétron. Nesses processos de interação com a matéria, os fótons gama podem ter sua energia totalmente dissipada ou parcialmente, isso depende do valor da sua energia e da forma como o fóton colide com os elementos que constituem o material. (MACEDO; PIRES e CORRECHEL, 2000)

No efeito fotoelétrico, o fóton é completamente absorvido e toda sua energia é transferida a um elétron ligado ao átomo que “escapa” com energia cinética igual à diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron no átomo.

O efeito fotoelétrico ocorre preferencialmente com elétrons da camada K, os quais têm uma energia de ligação maior (115 keV no Urânio, 7,1 keV no Ferro e 0,28 keV no Carbono). O "buraco" na camada K é preenchido por outro elétron proveniente da camada mais periférica havendo a emissão de raios X ou de um elétron Auger (FIGURA 8). O elétron Auger é produzido quando ocorre um efeito devido à sua baixa energia. A atenuação fotoelétrica varia de maneira complexa com a energia do fóton e com o valor de Z (número atômico) do absorvedor, ou seja, é maior para baixas energias e cresce rapidamente com o aumento do número atômico do átomo em questão presente no material.

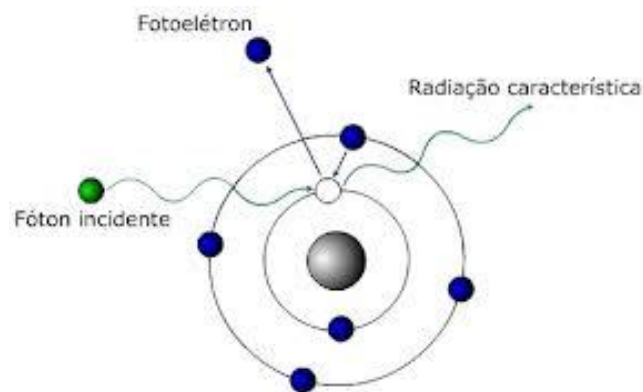


FIGURA 8 – Diagrama do efeito fotoelétrico.
(Fonte: www.webnode.com.br, 2012)

O efeito Compton é uma interação entre o fóton e um elétron de muito baixa energia de ligação ou livre. Considera-se um elétron como sendo livre, quando a energia do fóton que incide sobre ele é muito maior que sua energia de ligação no átomo. O espalhamento Compton, ao contrário do efeito fotoelétrico, geralmente envolve elétrons das camadas mais externas do átomo. O efeito Compton começa a ter importância à medida que a energia do fóton aumenta, diminuindo desta forma a contribuição do efeito fotoelétrico.

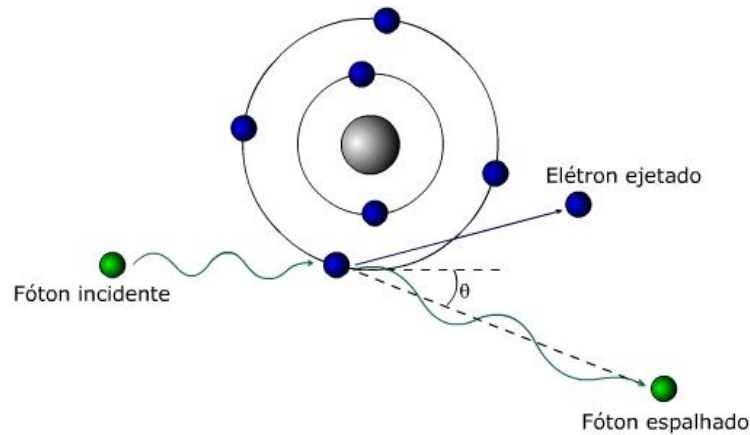


FIGURA 9 – Diagrama do efeito Compton.
(Fonte: www.webnode.com.br, 2012)

No processo Compton, o fóton incidente cede ao elétron uma parte de sua energia, adquirindo uma nova frequência e, conseqüentemente, possui uma menor energia. No processo de colisão com o elétron, o fóton espalhado é desviado de sua trajetória original, conforme mostra a FIGURA 9. (MACEDO; PIRES e CORRECHEL, 2000)

O fóton é espalhado por um ângulo (θ) entre suas direções original e final enquanto que o elétron se afasta em uma direção fazendo um ângulo (ϕ) com a direção inicial do fóton incidente. As trajetórias do fóton incidente, do fóton espalhado e do elétron estão sempre no mesmo plano.

Na produção de pares, o fóton interage com o campo de força nuclear do átomo alvo e desaparece totalmente (FIGURA 10). Há a criação de um par elétron-pósitron, ou seja, trata-se de uma transformação de energia em matéria de acordo com a fórmula de equivalência de Einstein ($E = mc^2$). A energia $2 m_0c^2 = 1,02$ MeV é limiar para o processo, sendo esta energia, equivalente a da massa de repouso necessária para criar o par elétron-pósitron. Este processo de interação apesar de importante, só ocorre quando se usa feixes de radiação com fótons de energia maior que 1,02 MeV. (MACEDO; PIRES e CORRECHEL, 2000)

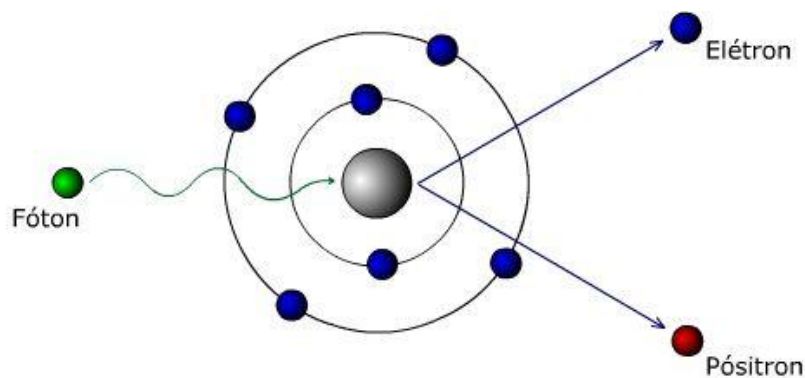


FIGURA 10 – Diagrama da produção de pares.
(Fonte: www.webnode.com.br, 2012)

A detecção da radiação gama é realizada através de um tubo Geiger-Muller localizado na base do aparelho, situado na extremidade oposta à da fonte.

O corpo do contador Geiger-Muller é constituído por um cilindro metálico fechado em ambas as extremidades (FIGURA 11). Uma das extremidades (faces) é fechada com uma camada mais fina do material que compõem o corpo da ampola, constituindo a janela do detector, ou seja, a zona por onde deverão entrar os fótons. Existem vários tamanhos e modelos de tubos Geiger-Muller disponíveis e sua capacidade de detecção e resposta varia proporcionalmente com sua área interna (FIGURA 12).

No eixo do cilindro é colocado um fio rígido, eletricamente isolado do corpo do detector. O tubo de Geiger-Muller é cheio com uma mistura escolhida de gases, e entre o fio central (ânodo) e o corpo cilíndrico (cátodo), é aplicada uma diferença de potencial (da ordem das centenas de Volts). (TERREMOTO, 2004)

Quando um fóton entra no tubo Geiger-Muller pode ionizar as moléculas do gás, criando pares elétron/íon. O campo elétrico aplicado faz a separação destes pares sendo os íons conduzidos para o cátodo e os elétrons para o ânodo.

Sabendo-se que os elétrons possuem uma massa muito inferior à dos íons, a velocidade que podem atingir ao serem acelerados pelo campo elétrico é também maior, atingindo rapidamente o ânodo. Por outro lado os íons são muito mais lentos, sendo necessários tempos da ordem do milissegundos para serem coletados. Neste processo os elétrons podem ganhar energia cinética suficiente para provocarem ionizações secundárias durante o seu trajeto até ao anodo.

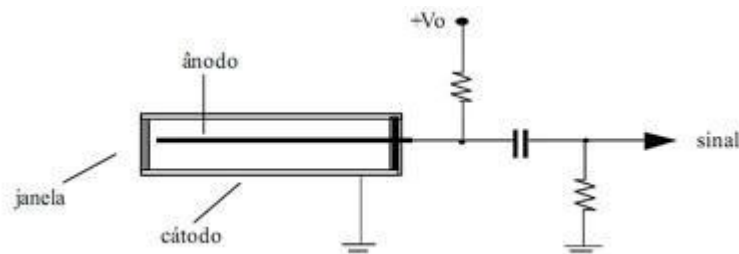


FIGURA 11 – Diagrama do tubo Geiger-Muller.
(Fonte: www.oic2009.blogspot.com.br, 2012)



FIGURA 12 – Detectores Geiger-Muller. Grande variedade de formas e tamanhos.
(Fonte: www.centronic.co.uk, 2012)

Inicia-se assim um processo de multiplicação de cargas, sendo, contudo o número final de cargas secundárias produzidas, proporcional à energia da partícula incidente. A este processo chama-se "avalanche de Townsend" e podem ser atingidos fatores de multiplicação da ordem de 10^6 partículas secundárias, no que se conhece como região proporcional.

Se a diferença de potencial aplicada ao tubo for suficientemente elevada, então o aumento do número de cargas elétricas leva a uma distorção do campo elétrico no interior do tubo, o que conduz à perda de proporcionalidade. Por outro lado o aumento do número de cargas livres aumenta também a probabilidade de ocorrerem recombinações entre os elétrons e íons. Destas recombinações resulta a emissão de fótons X que podem percorrer grandes distâncias dentro do tubo até serem de novo absorvidos. No caso de serem absorvidos no tubo irão desencadear novas avalanches. (TERREMOTO, 2004)

Desta forma todo o tubo participa com várias avalanches, sendo completamente perdida a proporcionalidade entre a energia da partícula inicial e a amplitude do sinal de saída, que vem saturado. Esta é a região de Geiger-Muller.

O processo de desenvolvimento das avalanches tende a parar quando a densidade de íons (que são mais lentos) é suficientemente elevada para blindar o campo elétrico aplicado. Existe certa probabilidade dos íons positivos, ao migrarem para o cátodo, ganharem energia cinética suficiente para ao chegarem a este e, arrancarem elétrons, que por sua vez reiniciam todo o processo. Para evitar que isto ocorra, ao gás do tubo é adicionado uma pequena quantidade de um segundo gás, chamado "gás de quenching". A missão do "gás de quenching" é a de neutralizar os íons (do gás primário) no seu trajeto para o cátodo, bem como a de absorver de forma mais eficiente os fótons X. (TERREMOTO, 2004)

Em geral como "gás de quenching" são usadas moléculas orgânicas complexas, como o etanol, enquanto no gás primário são usadas moléculas simples (por exemplo, argônio ou hélio).

A determinação da umidade presente no material se dá de forma semelhante à da densidade, sendo que para esta medição é utilizada uma fonte emissora de nêutrons ($^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$), capaz de gerar nêutrons rápidos (energia de 4 MeV), e que fica fixa na base do aparelho, próxima ao detector de nêutrons. Como método de detecção também utiliza um Geiger-Muller, sendo que preenchido com Hélio (^3He) ou com trifluoreto de boro (BF_3), conforme o modelo.

O ^{10}B é usado em vários tipos de detectores de nêutrons, principalmente nos detectores gasosos usando $^{10}\text{BF}_3$ ou detectores revestidos com boro (boron-lined). Esse elemento apresenta seção de choque de 3840 barns para nêutrons térmicos, já o ^3He apresenta seção de choque de 5330 barns para nêutrons térmicos.

Pelo fato de não possuírem carga elétrica, nêutrons não interagem com a matéria através da força Coulombiana. Como consequência, a presença de elétrons atômicos não altera a trajetória ou a energia cinética de nêutrons que incidem em um meio material. Esta característica faz com que os nêutrons sejam bastante penetrantes. A única maneira pela qual os nêutrons perdem energia cinética ao atravessarem um meio material é através de fenômenos decorrentes de interações com núcleos atômicos, chamada de moderação. (PEREIRA, 2012)

Para um determinado tipo de núcleo-alvo, as probabilidades relativas de ocorrência destes fenômenos mudam drasticamente com a energia cinética dos

nêutrons incidentes, classificados como muito rápidos ($15 \text{ MeV} < E \leq 50 \text{ MeV}$), rápidos ($0,1 \text{ MeV} < E \leq 15 \text{ MeV}$), intermediários ($1 \text{ keV} < E \leq 100 \text{ keV}$), epitérmicos ($1 \text{ eV} \leq E \leq 1 \text{ keV}$) e térmicos ($E < 1 \text{ eV}$). (TERREMOTO, 2004)

Para nêutrons com uma energia cinética bem definida (monoenergéticos) incidindo em um núcleo atômico conhecido, a probabilidade de ocorrência correspondente a uma constante e exibe uma atenuação exponencial característica ao atravessar este meio material. Esta probabilidade é denominada seção de choque σ (também usualmente designada como seção de choque microscópica), possui dimensão de área, sendo medida em unidades de barn ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). (TERREMOTO, 2004)

Em ambos os casos de medição, tanto para densidade quanto para umidade, a obtenção de resultados só é possível pois são aferidas constantes de calibração, com o uso de blocos cuja densidade/teor de umidade são conhecidas. Esses blocos de calibração são usados pelo medidor como forma de obter a radiação de fundo local (radiação de fundo), o que é fundamental para converter as contagens obtidas no teste de campo para um valor de densidade ou umidade real. (TROXLER, 2012)

2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E TÉCNICAS

Os medidores nucleares de densidade de solo modernos apresentam muitas características comuns entre si, na TABELA 2 estão descritas estas principais características relativas ao modelo 3440 do fabricante Troxler.

TABELA 2 – Características principais do densímetro Troxler.

Medidor Nuclear de Densidade de Solo – Troxler 3440	
Dimensões	597 H x 368 L x 229 W mm
Peso	14,1 Kg
Temperatura de operação	0 a 70° C
Temperatura máxima na superfície a ser medida	175° C
Umidade máxima	98% (não condensada)
Consumo máximo de energia	210 mA/h
Alimentação	Bateria recarregável (5 C NiMH) / 05 pilhas alcalinas (AA)
Fonte Gama	$3,7 \times 10^{-4}$ TBq ($\pm 10\%$) de ^{137}Cs . Formato: 04 cápsulas em aço inox duplamente selada contendo cloreto de Césio (pó)
Fonte de Nêutrons	$2,22 \times 10^{-3}$ TBq ($\pm 10\%$) de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$. Formato: 04 cápsulas em aço inox duplamente selada contendo óxido de Amerício/Berílio (pó)
Blindagem interna	Tungstênio (gama) e Polietileno borado (nêutrons)

Fonte: Troxler, 2012.

2.4. CATEGORIZAÇÃO DE FONTES

Como forma de criar um sistema simplificado e lógico de classificação de fontes de radiação ionizante, baseado em sua periculosidade e potencial de provocar danos à saúde humana e ao meio ambiente, estabeleceu-se um método de categorização de fontes que é aceito internacionalmente, baseado no TECDOC-1344 e na RS-G-1.9 da AIEA. (IAEA, 2005)

Esta categorização classifica a periculosidade de uma fonte mediante o detrimento causado, uma vez estando fora de controle. Baseia-se na relação A/D, sendo A = atividade da fonte e D = atividade da fonte que pode causar efeitos determinísticos severos (entende-se por efeitos determinísticos severos aqueles que põem em risco a vida ou resultem em danos que afetem de maneira permanente a qualidade de vida do indivíduo), descritos na TABELA 3.

Os valores D são referenciados individualmente por cada radionuclídeo, conforme exemplificado na TABELA 4, e levam em conta fatores como:

D₁ = Uma fonte sem blindagem, que se segura na mão por 1 hora, que se leva no bolso por 10 horas e que permanece dentro de casa por dias ou semanas.

D₂ = Dispersão da fonte (através de fogo, explosão ou ação humana), inalação, ingestão ou contaminação da pele.

TABELA 3 – Classificação D conforme tecido/dose.

Tecido	Critério de Dose
Medula óssea	1 Gy em 2 dias; 1 Gy em 100 horas para uma fonte muito grande para ser transportada manualmente.
Pulmões	6 Gy em 2 dias devido à radiações de baixo LET; 2 Gy em 1 ano devido à radiações de alto LET.
Tireóide	5 Gy em 2 dias.
Pele / Contato Com o tecido	25 Gy a 2 cm de profundidade (ou 1 cm para a mão), durante 10 horas.

Fonte: IAEA, 2005

Como exemplos dos valores D, temos:

TABELA 4 – Exemplos de valores D por radionuclídeos.

Radionuclídeo	D (TBq)
²⁴¹ Am/ ⁹ Be	0,06
⁶⁰ Co	0,03
¹³⁷ Cs	0,1
¹⁹² Ir	0,08
²³⁸ Pu	0,06
⁹⁰ Sr	1,0
^{99m} Tc	0,7

Fonte: IAEA, 2005

Desta forma temos que a atividade (A) de determinada fonte, dividida pelo fator (D) correspondente ao radionuclídeo, resulta em um valor que a categoriza como descrito na TABELA 5. Estes valores costumam variar entre 10^6 e 10^{-6} e envolve outros fatores que levam em consideração a forma física e química da fonte, o tipo de blindagem, suas circunstâncias de utilização e mesmo a experiência em acidentes anteriores. Com isso as fontes se distribuem em 5 categorias:

TABELA 5 – Categorização de fontes.

Categoria	Relação A/D	Descrição
Categoria 1	$A/D \geq 1000$	Fonte extremamente perigosa; Pode causar lesões permanentes em alguns segundos; Pode levar ao óbito em exposições de alguns minutos;
Categoria 2	$1000 > A/D \geq 10$	Fonte muito perigosa; Pode causar lesões permanentes em alguns minutos; Pode levar ao óbito em exposições de horas ou dias;
Categoria 3	$10 > A/D \geq 1$	Fonte perigosa; Pode causar lesões permanentes em algumas horas; Pode levar ao óbito em exposições de dias ou semanas;
Categoria 4	$1 > A/D \geq 0,01$	Fonte pouco perigosa; Nenhuma lesão permanente é esperada devido à sua manipulação; Pouca probabilidade de ocorrência de efeitos temporários devido à sua manipulação por períodos de semanas.
Categoria 5	$0,01 > A/D$ e $A >$ Nível de isenção	Fonte não perigosa; Muito próxima ou abaixo do nível de isenção; Nenhuma lesão ou efeito são esperados.

Fonte: IAEA, 2005

Com base nestes dados e, considerando que equipamentos que contenham mais de uma fonte devem levar em conta a de maior risco, os densímetros nucleares recebem a categorização 4 (fontes pouco perigosas), pois suas atividades máximas são 0,37 GBq (10 mCi) para ^{137}Cs (gama) e 2,22 GBq (60 mCi) para $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$, sendo assim, temos:

Atividade $^{137}\text{Cs} = 0,37 \text{ GBq} \rightarrow 0,00037 \text{ TBq}$

$D=0,1$, então temos que:

$$A/D = \frac{3,7 \times 10^{-4} \text{ TBq}}{0,1} \quad (1)$$

$$A/D = 0,0037$$

Conforme a TABELA 5, de acordo com os valores encontrados ($A/D=0,0037$), esta fonte se enquadra na categoria 5 (fonte não perigosa).

Atividade $^{241}\text{Am}/^9\text{Be} = 2,22 \text{ GBq} \rightarrow 0,00222 \text{ TBq}$

$D=0,06$, então temos que:

$$A/D = \frac{2,22 \times 10^{-3} \text{ TBq}}{0,06} \quad (2)$$

$$A/D = 3,7 \times 10^{-2} \text{ ou } 0,037$$

Conforme a TABELA 5, de acordo com os valores encontrados ($A/D=3,7 \times 10^{-2} = 0,037$), esta fonte se enquadra na categoria 4 (fonte pouco perigosa).

2.5. RISCO RADIOLÓGICO

O risco radiológico é um conceito associado à fonte ou prática envolvendo uma fonte radioativa. Ele leva em conta o radionuclídeo, sua forma física (sólida, líquida ou gasosa), seu potencial de dispersão e absorção quando a fonte fica exposta no meio ambiente. As fontes utilizadas nos medidores nucleares de densidade de solo são compostas por ^{137}Cs e por um composto de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$.

O céσιο é um metal alcalino encontrado em forma líquida quando em temperatura ambiente. Em sua forma metálica sólida reage com a água de forma altamente explosiva. Seu isótopo radioativo utilizado na confecção de fontes é o ^{137}Cs e só é obtido artificialmente através de reações nucleares. Este, por ser um cloreto, possui grande poder de dispersividade e de solubilidade. O ^{137}Cs tem meia vida de 30,2 anos e, quando incorporado acumula-se principalmente nos músculos.

O berílio natural é um metal com grande toxicidade química, atingindo principalmente os pulmões e causando dermatites quando em contato direto com a pele. Seu isótopo utilizado na confecção de fontes de nêutrons é o ^9Be (estável), na forma de óxido de berílio em pó.

O amerício é um metal que se encontra sob a forma sólida. Sua obtenção se dá através de reações em reatores nucleares decorrentes de decaimentos do plutônio. Sob forma de óxido, o isótopo utilizado, ^{241}Am tem meia vida de 432,2 anos e se combina com o berílio formando uma liga metálica. O amerício, através de suas emissões alfa, interage com o berílio gerando nêutrons.

A liga de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ por ser uma combinação de óxidos não é metabolizada facilmente, permanecendo por um grande tempo em nosso organismo caso seja incorporada.

As fontes utilizadas possuem baixa periculosidade devido ao duplo encapsulamento feito de aço inox, entretanto, por estarem em estado físico sólido em forma de pó, possuem alta dispersividade. (UFRS, 2006)

2.6. INVENTÁRIO DE MEDIDORES NUCLEARES NO BRASIL

De acordo com os registros da CNEN, existem hoje 397 instalações autorizadas a operar com medidores nucleares (FIGURA 13), divididas entre controle de processos e sistemas portáteis, sendo: 227 na região sudeste, 60 na região nordeste, 22 na região centro-oeste, 18 na região norte e 70 na região sul, conforme apresentado na TABELA 6. (CNEN, 2012e)



FIGURA 13 – Distribuição das empresas registradas para uso de medidores nucleares no Brasil.

TABELA 6 – Quantidade de instalações autorizadas e tipos de medidores nucleares por região.

Região	Controle de Processos	Sistemas Portáteis
Norte	18	00
Nordeste	54	06
Centro-Oeste	21	01
Sudeste	209	14
Sul	69	01

Fonte: CNEN, 2012e.

Deste total de medidores nucleares relacionados, atualmente no Brasil, quem opera medidores nucleares de densidade de solo é a PATTROL – PAVIMENTOS,

TRAÇADOS E OBRAS Ltda, que tem sua autorização para operação sob o número de ofício 5068/2011 – CGMI/CNEN, de 17/01/2011. (PATTROL, 2012b)

A Empresa Pattrol atua tecnicamente na prestação de serviços executando Controle de compactação com densímetro nuclear; Ensaios especiais de geotécnica em laboratório; Controle tecnológico de obras; Instrumentação geotécnica; Investigação geotécnica; Sondagem SPT, Mista e Rotativa e; Avaliação mecânica de pavimentos. (PATTROL, 2012c)

Para a atuação com os densímetros nucleares conta dois supervisores de radioproteção para controlar seus 12 medidores nucleares da marca Troxler, os quais tem incorporadas um total de 24 fontes radioativas, sendo: 12 fontes seladas de ^{137}Cs (8mCi) e 12 fontes seladas de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ (40 mCi). (PATTROL, 2012b)

2.7. MONITORAÇÃO INDIVIDUAL

A CNEN estabelece um limite de dose para IOEs e público conforme descrito na TABELA 7.

TABELA 7 – Limites de dose para IOEs e público.

Limites de dose anuais ^(a)			
Grandeza	Órgão	IOE	Público
Dose Efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^(b)	1 mSv ^(d)
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv ^{(b)(c)}	15 mSv
	Pele ^(e)	500 mSv	50 mSv
	Mãos e Pés	500 mSv	---

Fonte: CNEN, 2005.

(a) Para fins de *controle administrativo* efetuado pela CNEN, o termo *dose* anual deve ser considerado como *dose* no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

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

(c) Alterado pela Resolução CNEN 114/2011.

(d) 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.

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

Para garantir o controle de dose nos trabalhadores são utilizados dosímetros pessoais. Como existem diversos tipos de dosímetros e, dentre estes alguns com aplicações específicas para cada tipo de radiação, recomenda-se a adequação da dosimetria ao tipo específico de uso. (DANTAS, 2012)

A dosimetria das radiações X e gama pode ser feita com dosímetros que utilizam emulsões fotográficas. Estes dosímetros utilizam filmes radiográficos

sensíveis a esses tipos de radiação para determinar a dose recebida por seu portador. O princípio de funcionamento é simples, a radiação gama ou X incide sobre o material do dosímetro e é filtrada por uma série de anteparos feitos de alguns materiais específicos (plástico, alumínio, cobre e chumbo), em espessuras pré-estabelecidas, para então atingir e sensibilizar o filme. Desta forma é possível determinar qual a quantidade e a energia das radiações atingiu o dosímetro e, com isso, calcular a dose. Esses dosímetros são mais baratos, entretanto se limitam a um único uso por filme.

Os nêutrons, por serem um tipo especial de radiação que não possui carga, necessitam de métodos especiais para serem detectados e medidos. Para isso pode-se usar dosímetros termoluminescentes (TLD). Esse tipo de dosímetro permite a detecção de vários tipos de radiação (X, gama e nêutrons), e se baseia no princípio físico de acúmulo de energia, característico de alguns materiais ao serem expostos à radiação. Uma vez expostos, esses materiais termoluminescentes acumulam e retém a energia depositada até receberem um novo estímulo, que pode ser luminoso ou térmico. Baseado neste princípio, uma vez expostos, os dosímetros TLD são enviados para a leitura em laboratórios especializados que estimulam e quantificam os cristais do TLD, determinando assim as doses recebidas. Esse tipo de dosímetro é mais caro, entretanto os cristais utilizados na detecção da radiação podem ser reaproveitados em novos dosímetros.

Uma característica importante quanto aos dosímetros de TLD em relação à detecção dos nêutrons é que a captação destes não é direta. É utilizada a técnica chamada de albedo, isto é, ao interagirem com os átomos de hidrogênio do nosso corpo, os nêutrons sofrem moderação e, então são refletidos para os cristais de TLD do dosímetro. Para impedir que nêutrons rápidos atinjam o dosímetro este recebe uma blindagem composta de cádmio e boro.

Por serem de leitura indireta esses tipos de dosímetro precisam ser enviados a um laboratório para serem lidos e, então gerado um relatório com o histórico das doses recebidas. (DANTAS, 2012)

2.8. NOVOS MODELOS DE MEDIDORES NUCLEARES DE DENSIDADE DE SOLO

Dentre todos os fabricantes existentes, o conceito de construção dos medidores nucleares de densidade de solo é comum a todos, não sofrendo variações ao longo da evolução tecnológica no que se refere à parte radiológica do equipamento. É certo que novos métodos de blindagem são desenvolvidos mas, neste tipo de equipamento, isso fica restrito aos cálculos de sua espessura, que pode variar em função das exigências quanto a radioproteção (limites de dose externos), já que as fontes radioativas utilizadas tem suas atividades bem definidas e são bem conhecidas.

No tocante a parte eletrônica deste tipo de medidor, a grande evolução se faz presente nos componentes que o integram. Cada vez mais precisos e resistentes a variações climáticas, são capazes de resistir a umidade e tem um consumo reduzido

de energia, aumentando a autonomia do equipamento e o tornando mais robusto para enfrentar as condições encontradas no campo.

Alguns modelos mais recentes, como é o caso do 3440 Plus, desenvolvido em 2007 pelo fabricante Troxler, é capaz de resistir em situações onde a umidade relativa do ar chega a 98% e a operar sob chuva em locais onde existam lâminas d'água no chão de até 1 cm. Para isso o equipamento conta com um software interno que, ao ser programado, faz a correção das condições encontradas de forma a apresentar resultados precisos.

Além disso esse novo modelo possui embarcado um localizador GPS (Global Positioning System), capaz de enviar em tempo real os dados obtidos nas medições realizadas, juntamente com sua localização exata, para um receptor que computa esses dados e pode ser programado para transferir essas informações para um banco de dados ou outro local de interesse do operador como por exemplo um escritório matriz, um engenheiro encarregado ou para o responsável da operação. Desta forma é possível avaliar, em tempo real, as condições de densidade e umidade encontradas no local e definir estratégias.



FIGURA 14 – Painel do medidor Troxler 3440 Plus.
(Fonte: www.troxler.com, 2012)

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em três etapas distintas para facilitar as avaliações de cada uma delas e, seguindo uma cronologia que permita uma manipulação mais segura do medidor nuclear de densidade de solo, conforme seu uso real. Com esta divisão também foi possível avaliar individualmente os objetivos propostos, de forma a permitir a identificação de possíveis falhas pontuais no medidor em cada etapa, permitindo seu uso seguro.

A primeira etapa foi uma avaliação radiológica do equipamento em laboratório. O objetivo desta etapa foi quantificar os níveis de radiação do densímetro nuclear de solo em um ambiente controlado, de forma a permitir a comparação desses níveis obtidos com os limites máximos estipulados pelo fabricante, de modo a caracterizar se o densímetro está em condições seguras de uso.

A segunda etapa foi a realização de um teste de esfregaço nas fontes de ^{137}Cs . O objetivo desta etapa foi verificar se as fontes estavam com suas cápsulas íntegras, evitando assim possíveis contaminações nos indivíduos e no meio ambiente.

A terceira etapa foi uma avaliação radiológica em campo. O objetivo desta avaliação foi medir os níveis de radiação em condições reais de uso do densímetro e compará-los com os recomendados pelo fabricante e, também, verificar se os níveis de dose encontrados estão dentro dos limites da regulamentação brasileira.

Esta avaliação radiológica se realizou no laboratório de indústria do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD e foram utilizados 4 medidores nucleares de densidade de solo, sendo dois do fabricante Troxler e 2 do fabricante Soiltest. Na TABELA 8 são relacionados os dados referentes a estes equipamentos:

TABELA 8 - Dados dos medidores nucleares de densidade de solo utilizados.

Medidor	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3	Medidor 4
Fabricante	Troxler	Troxler	Soiltest	Soiltest
Modelo	2401	2401	NIC – 5DTM	NIC – 5CS
Nº de série	AC 5017	AC 5019	77D010	77D011
Data da Fonte	27/06/1975	27/06/1975	03/1977	03/1977
Atividade Gama	0,289 Gbq (7,8 mCi)	0,303 GBq (8,2 mCi)	0,37 GBq (10 mCi)	0,37 GBq (10 mCi)
Atividade Nêutrons	1,85 GBq (50 mCi)	1,85 GBq (50 mCi)	2,22 GBq (60 mCi)	2,22 GBq (60 mCi)
Atividade Gama em 03/06/2012	0,123 GB (3,32 mCi)	0,129 GBq (3,49 mCi)	0,164 GBq (3,49 mCi)	0,164 GBq (3,49 mCi)
Atividade Nêutrons em 03/06/2012	1,74 GBq (47 mCi)	1,74 GBq (47 mCi)	2,09 GBq (56,7 mCi)	2,09 GBq (56,7 mCi)

Também foram utilizados monitores e sondas de radiação conforme descritos nas TABELAS 9 e 10, respectivamente:

TABELA 9 - Relação dos monitores de radiação utilizados.

Monitor	Monitor 1	Monitor 2
Tipo	Gama	Nêutrons
Fabricante	Eberline	Eberline
Modelo	E 600	ESM FH 40 G-L
Nº de série	01623	---
Calibração	03/11/2011	03/11/2012

TABELA 10 - Relação das sondas utilizadas em conjunto com os monitores de radiação.

Sonda	Sonda 1	Sonda 2	Sonda3	Sonda4
Tipo	Gama/Beta	Alfa/Beta	Nêutrons	Nêutrons
Fabricante	Eberline	Eberline	Eberline	Eberline
Modelo	SHP 270	SHP 360	Swendi 2	Termo ESM – FHT 752
Nº de série	00387	00243	02520	---
Calibração	03/11/2011	03/11/2011	03/11/2011	03/11/2011

3.1. AVALIAÇÃO RADIOLÓGICA DO MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO EM LABORATÓRIO

Conhecer as taxas de dose de cada equipamento é imprescindível para que se estabeleça um procedimento de uso seguro. Para os IOEs é importante saber as doses próximas ao medidor, pois o mesmo é constantemente transportado e necessitam de aproximação para seu ajuste, calibração e programação das medições.

Nas TABELAS 11 e 12 são descritos os limites de dose recomendados pelo fabricante Troxler, para radiação gama e radiação de nêutrons, respectivamente.

TABELA 11 – Limites de taxa de dose para radiação gama recomendados pelo fabricante

Limites de taxa de dose para radiação gama ($\mu\text{Sv/h}$)							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	55	160	40	90	110	---	170
30 cm	9,0	140	16	14	15	---	5,0
100 cm	1,0	20	3,0	3,0	2,0	---	1,0

Fonte: TROXLER, 2012a.

TABELA 12 – Limites de taxa de dose para radiação de nêutrons recomendados pelo fabricante

Limites de taxa de dose para radiação de nêutrons ($\mu\text{Sv/h}$)							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	4,0	3,0	3,0	6,0	7,5	---	20
30 cm	1,5	0,5	1,0	2,0	2,0	---	2,0
100 cm	<0,5	<0,5	<0,5	0,5	<0,5	---	0,5

Fonte: TROXLER, 2012a.

Nesta primeira etapa comparamos os limites de taxa de dose recomendados pelo fabricante Troxler com as taxas de dose encontradas por nós, nos pontos de interesse do medidor nuclear de densidade de solo.

Uma vez conhecidas as doses recomendadas pelo fabricante, realizamos 5 (cinco) medias em cada um dos pontos de interesse, em cada um dos 4 (quatro) medidores nucleares de densidade de solo. Nas FIGURAS 15 e 16 ilustramos parte desta etapa.

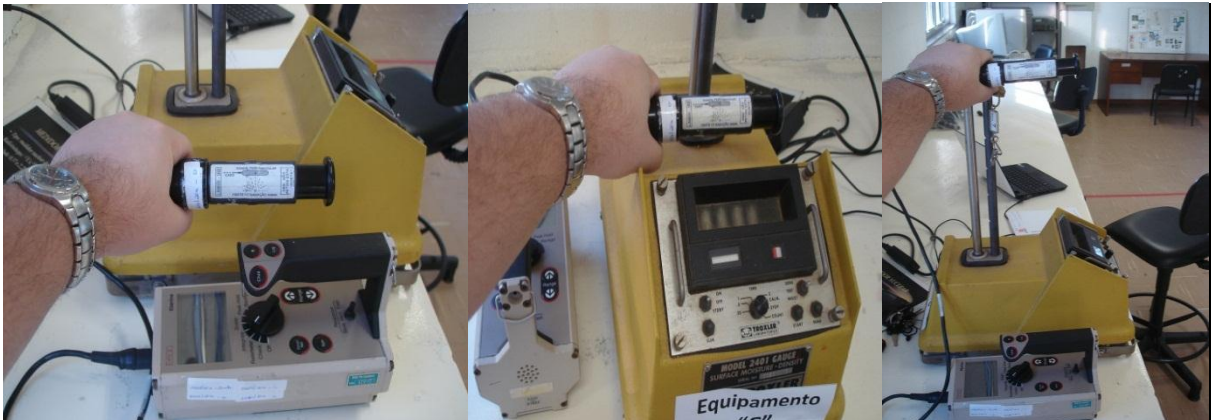


FIGURA 15 – Levantamento radiométrico para radiação gama. Medidas na superfície esquerda, acima e na alça, respectivamente.



FIGURA 16 – Levantamento radiométrico para nêutrons na superfície e a 30 cm respectivamente.

Foram realizadas um total de 840 medições, sendo 210 em cada medidor nuclear, divididas em 5 medidas para cada um dos 7 pontos de interesse, tanto para

radiação gama quanto para radiação de nêutrons. Com esses dados calculamos a média aritmética para cada ponto específico de cada medidor onde obtivemos os seguintes resultados, descritos nas TABELAS 13, 14, 15 e 16 para radiação gama e 17, 18, 19 e 20 para radiação de nêutrons, respectivamente para cada medidor.

TABELA 13 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 1 para a fonte gama.

Avaliação radiológica da fonte gama ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 1							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	14,71	45,32	23,12	37,08	38,81	396,27	32,33
30 cm	4,70	39,84	4,87	6,94	1,63	90,46	---
100 cm	0,12	4,72	0,32	0,41	<0,01	34,11	---

TABELA 14 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 2 para a fonte gama.

Avaliação radiológica da fonte gama ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 2							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	17,06	49,43	24,56	41,04	39,30	491,94	31,46
30 cm	5,92	38,84	7,16	9,38	1,58	102,61	---
100 cm	0,36	5,82	1,11	0,72	0,02	42,74	---

TABELA 15 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 3 para a fonte gama.

Avaliação radiológica da fonte gama ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 3							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	18,02	53,66	27,62	44,06	41,78	507,05	32,82
30 cm	6,54	40,23	8,58	8,38	3,48	112,44	---
100 cm	0,53	8,49	1,23	1,04	0,43	51,07	---

TABELA 16 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 4 para a fonte gama.

Avaliação radiológica da fonte gama ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 4							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	17,93	52,16	28,02	49,62	47,61	504,11	37,65
30 cm	6,17	41,99	9,18	9,03	5,01	108,49	---
100 cm	0,67	7,74	1,27	0,97	0,81	51,73	---

- A radiação gama de fundo registrada na sala onde foram realizadas as medições foi de $683 \mu\text{Sv/h}$.
- Os valores apresentados se constituem das médias aritméticas obtidas nas 5 (cinco) medições realizadas em cada um dos pontos de interesse relacionados.

- c) Os valores apresentados nas tabelas já estão com a radiação de fundo descontada.

TABELA 17 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 1 para a fonte de nêutrons.

Avaliação radiológica da fonte de nêutrons ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 1							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	2,64	2,81	2,56	4,04	5,89	492,04	18,33
30 cm	0,79	0,39	0,72	1,17	1,67	126,55	---
100 cm	0,35	0,29	0,46	0,40	0,48	19,82	---

TABELA 18 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 2 para a fonte de nêutrons.

Avaliação radiológica da fonte de nêutrons ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 2							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	2,79	2,12	2,71	4,39	6,32	504,33	19,41
30 cm	0,94	0,37	0,64	1,21	1,83	131,09	---
100 cm	0,31	0,21	0,44	0,34	0,47	20,47	---

TABELA 19 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 3 para a fonte de nêutrons.

Avaliação radiológica da fonte de nêutrons ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 3							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	3,17	2,74	2,19	4,39	5,82	534,72	16,41
30 cm	1,07	0,39	0,84	1,19	1,91	102,03	---
100 cm	0,39	0,27	0,47	0,41	0,49	16,81	---

TABELA 20 – Resultados obtidos no levantamento radiológico do medidor 4 para a fonte de nêutrons.

Avaliação radiológica da fonte de nêutrons ($\mu\text{Sv/h}$) – Medidor 4							
Posição	Frente	Esquerda	Direita	Traseira	Topo	Abaixo	Alça
Superfície	3,38	2,57	2,72	4,45	6,32	525,03	18,17
30 cm	1,39	0,43	0,78	1,18	1,83	119,46	---
100 cm	0,43	0,3	0,41	0,34	0,47	19,66	---

- a) A radiação de nêutrons de fundo registrada na sala onde foram realizadas as medições foi de 481 nSv/h .
- b) Os valores apresentados se constituem das médias aritméticas obtidas nas 5 (cinco) medições realizadas em cada um dos pontos de interesse relacionados.

c) Os valores apresentados nas tabelas já estão com a radiação de fundo descontada.

Com base nos valores obtidos nas tabelas de avaliação radiológica de cada medidor nuclear de densidade de solo, tanto nas medidas para radiação gama, quanto para nêutrons, concluímos que, uma vez comparados com os limites de taxa de dose recomendados pelo fabricante, os medidores nucleares avaliados se encontram operacionais do ponto de vista da proteção radiológica.

3.2. AVALIAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO

Como recomendação dos fabricantes, o controle dos equipamentos utilizados pelos IOEs que contenham materiais radioativos, deve incluir um teste de avaliação de contaminação. Dentre os testes de existentes, há o de esfregaço, que é feito na superfície das fontes e nas superfícies expostas do equipamento próximas às fontes.

Sua finalidade é verificar a integridade do encapsulamento das fontes radioativas (seladas), garantindo que seu manuseio seja feito de forma segura, isto é, sem riscos de contaminação, desta forma ajudando a manter as doses de radiação (dos operadores e do público) abaixo dos níveis recomendados e evitando a contaminação do meio ambiente.

É importante que o executor deste teste conheça bem o equipamento a ser avaliado. Também é importante que conheça as regras de radioproteção e segurança, além de possuir o guia de procedimentos para auxiliá-lo durante o teste, bem como o guia de procedimentos em caso de emergência ou de acidentes envolvendo o medidor nuclear. (TROXLER, 2012b)

No Brasil esta avaliação de contaminação deve ser realizada ou conduzida pelo Supervisor de Radioproteção, devendo ser realizado periodicamente, de acordo com o Plano de Radioproteção da empresa que é enviado para a CNEN e aprovado por esta.

Cada instituição tem autonomia para, através de seu supervisor de radioproteção, otimizar seus procedimentos reduzindo o nível de interdição do equipamento através da determinação de níveis de atividade abaixo do recomendado pelo fabricante.

Não havendo detecção de atividade na amostra, deve-se liberar o aparelho para uso. Caso seja identificada alguma atividade na amostra acima dos níveis recomendados pelo fabricante (1,85 KBq; 0,05 mCi), orientar a retirada de operação do equipamento, mantendo-o em local adequado para seu posterior encaminhamento à manutenção técnica. (TROXLER, 2012b)

Como segunda etapa deste trabalho de avaliação radiológica, analisamos os medidores nucleares de densidade de solo a fim de detectar possíveis falhas na integridade do encapsulamento nas fontes de ^{137}Cs , para isso criamos um setup para a realização do teste de esfregaço nestas fontes.

Este setup foi composto por uma haste metálica devidamente moldada para facilitar o acesso à sonda gama, conforme FIGURA 18 e um jogo de espelhos para auxiliar o posicionamento do nosso protótipo de amostrador em relação à fonte, conforme FIGURA 20.

O primeiro passo para a realização deste teste é separar todo o material necessário (monitores, detectores, guia de procedimentos, guia de emergência, coletores de amostra, amostrador, equipamentos de segurança, jogo de espelhos, fontes teste, etc.). Em seguida verificar as condições de operação dos equipamentos de monitoração (data de calibração, teste de resposta com fonte teste, nível de bateria, compatibilidade com o tipo de radiação a ser medida, etc.) conforme exemplificado na FIGURA 17.



FIGURA 17 – Monitor com detector gama e detalhe do detector beta.

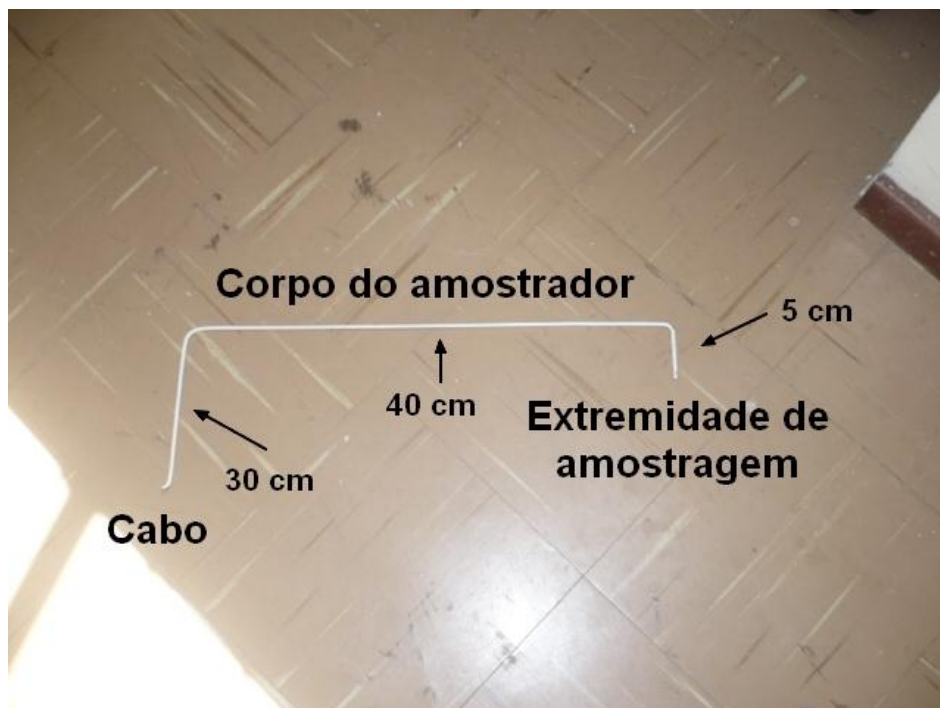


FIGURA 18 – Protótipo do amostrador para teste de esfregaço.

O próximo passo para a realização do teste de esfregaço no medidor nuclear de densidade de solo é medir a radiação de fundo do local onde serão feitas as análises e, só então posicionar o medidor sobre uma bancada firme, revestida com plástico ou outro material não absorvedor em caso de contaminação, em um local de circulação controlada de pessoas e, se certificar de que o mesmo esteja com a fonte gama devidamente travada (FIGURA 19).

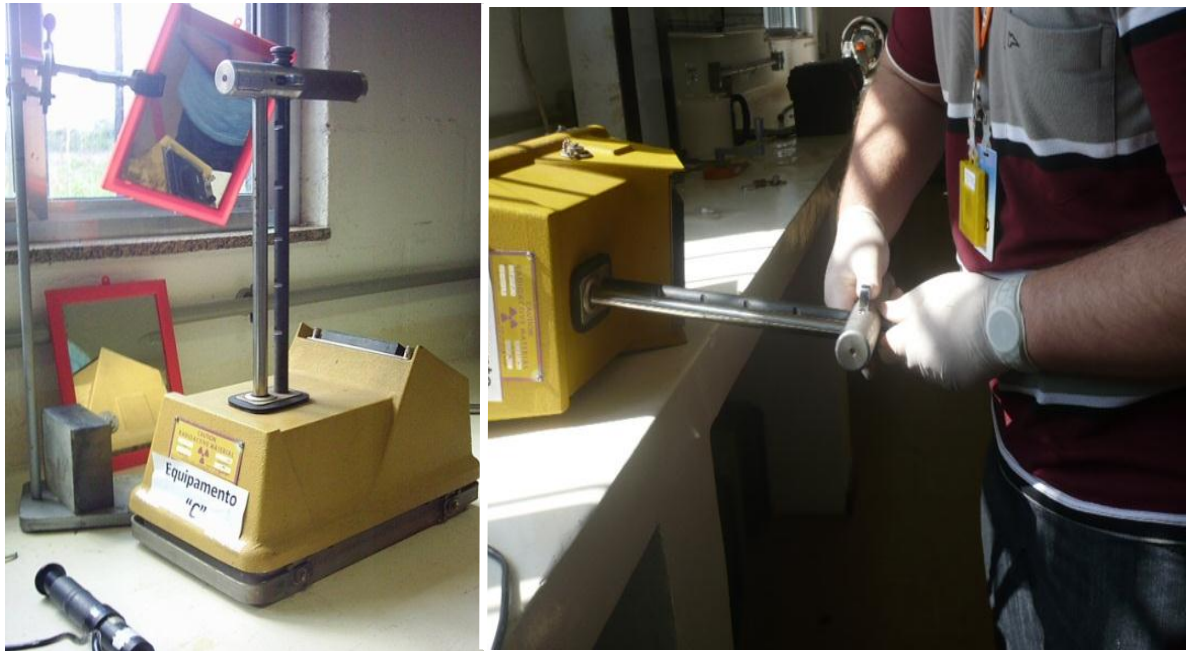


FIGURA 19 – Medidor nuclear posicionado sobre bancada e verificação de segurança da fonte gama.

Em seguida deve-se posicionar o jogo de espelhos que irá auxiliar no teste de esfregaço.



FIGURA 20 – Posicionamento do jogo de espelhos e detalhe do canal da fonte, respectivamente.

Após o posicionamento do densímetro e do jogo de espelhos deve-se calçar as luvas para evitar possíveis contaminações e, em seguida, preparar todo o material para a coleta do esfregaço conforme FIGURA 21.

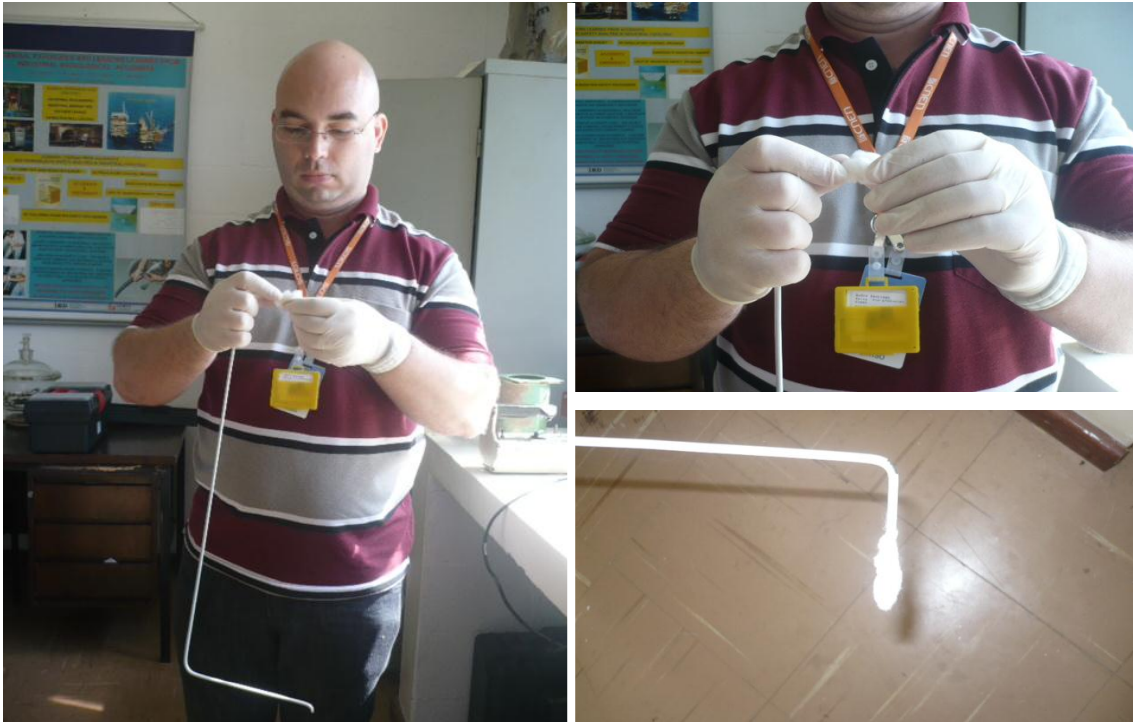


FIGURA 21 – Sequência de preparo do amostrador.

Cuidadosamente deve-se empurrar a sonda para baixo a fim de abrir a blindagem do aparelho e, com isso introduzir a extremidade do amostrador no canal da fonte (FIGURA 22) até que haja contato entre o amostrador e a sonda contendo a fonte gama.



FIGURA 22 – Abertura da blindagem e introdução do amostrador no canal da fonte.

Após tocar a extremidade do amostrador na sonda, procede-se o “esfregaço”, girando o amostrador de modo a coletar a maior quantidade possível de material. É

importante frisar que durante todo o tempo em que o densímetro fica com a blindagem aberta há a monitoração constante dos níveis de radiação (FIGURA 23).



FIGURA 23 – Processo de esfregaço com constante monitoração da área.

Após terminar o esfregaço, deve-se retirar a extremidade do amostrador do canal da fonte e, cuidadosamente, introduzir a amostra em um envelope plástico para que se procedam as medições. Este envelope deve ser devidamente lacrado e identificado (FIGURA 24) com os dados do equipamento, da fonte, do monitor de radiação utilizado e do responsável pelas medidas.

Cada invólucro, contendo cada um dos coletores de amostra, deve conter as seguintes informações:

Ficha de identificação de amostra		
Data:	Hora	
Proprietário/Titular:		
Dados do medidor nuclear		
Fabricante:	Modelo:	Nº de série
Dados da fonte		
Tipo de radiação:	Atividade:	Data da fonte:
Dados do detector/monitor de radiação		
Fabricante:	Modelo:	Nº de série
Tipo de monitor:	Data da calibração:	Radiação de fundo:
Responsável pela coleta:		Tipo de amostra:
Resultado:		

FIGURA 24 – Modelo de ficha de identificação de amostra

É imprescindível que as avaliações de contaminação sejam feitas com equipamentos devidamente calibrados e condizentes com os tipos de radiação analisados (FIGURA 25).



FIGURA 25 – Monitoração das amostras. Análise gama e beta, respectivamente.

Durante nossos primeiros testes de esfregaço, houve o desprendimento do algodão fixado na extremidade do amostrador, ainda dentro do canal da fonte do densímetro. Isto ocorreu porque, durante a fixação deste algodão que serviria para coletar nossa amostra, estávamos utilizando luvas de látex por medida de segurança. Foi percebido que o material utilizado como amostrador (o algodão) deslizava sobre o material da luva (látex).

Procedemos com a retirada do algodão contendo a amostra com o auxílio de uma pinça de cabo longo conforme mostra a FIGURA 26.



FIGURA 26 – Retirada da amostra presa no canal da fonte.

Apesar de não termos encontrado nenhuma contaminação nas amostras do teste de esfregaço realizadas, por medida de segurança monitoramos, também, a extremidade da pinça utilizada para retirar a amostra do canal da fonte (FIGURA 27), onde, da mesma forma, as atividades registradas ficaram no mesmo nível da radiação de fundo, caracterizando que não houve nenhuma contaminação.



FIGURA 27 – Monitoração da extremidade da pinça.

Nesta etapa concluímos que, como não foram encontrados níveis de atividade acima da radiação de fundo nas amostras analisadas, os medidores nucleares de densidade de solo avaliados, do ponto de vista da proteção radiológica, estão liberados para uso.

3.3. AVALIAÇÃO RADIOLÓGICA DO MEDIDOR NUCLEAR DE DENSIDADE DE SOLO EM CAMPO

Como terceira etapa desta avaliação radiológica, realizamos um levantamento em campo do medidor nuclear de densidade de solo, simulando seu uso real de modo a nos permitir comparar as taxas de dose dos resultados obtidos nestes levantamentos com os limites de taxas de dose estabelecidos pela CNEN.

A garantia de limitação da dose para o público se dá através do isolamento da área ao redor do medidor a fim de interpor uma distância mínima entre a fonte de radiação e estes indivíduos, que podem ser meros observadores ou outros trabalhadores do local. Sabendo que a CNEN limita a dose recebida por indivíduos do público em 1 mSv/ano, temos que:

$$1 \text{ ano de trabalho} = 2000 \text{ horas} \quad (3)$$

$$1 \frac{\text{mSv}}{\text{ano}} \div 2000 \frac{\text{horas}}{\text{ano}} = 0,5 \mu\text{Sv/hora}$$

Ou seja, para garantir que nenhum indivíduo do público exceda o limite máximo de dose estabelecido, temos que lhes garantir uma taxa de dose igual ou inferior a 0,5 μ Sv/hora atrás das linhas de isolamento, representadas na FIGURA 27.

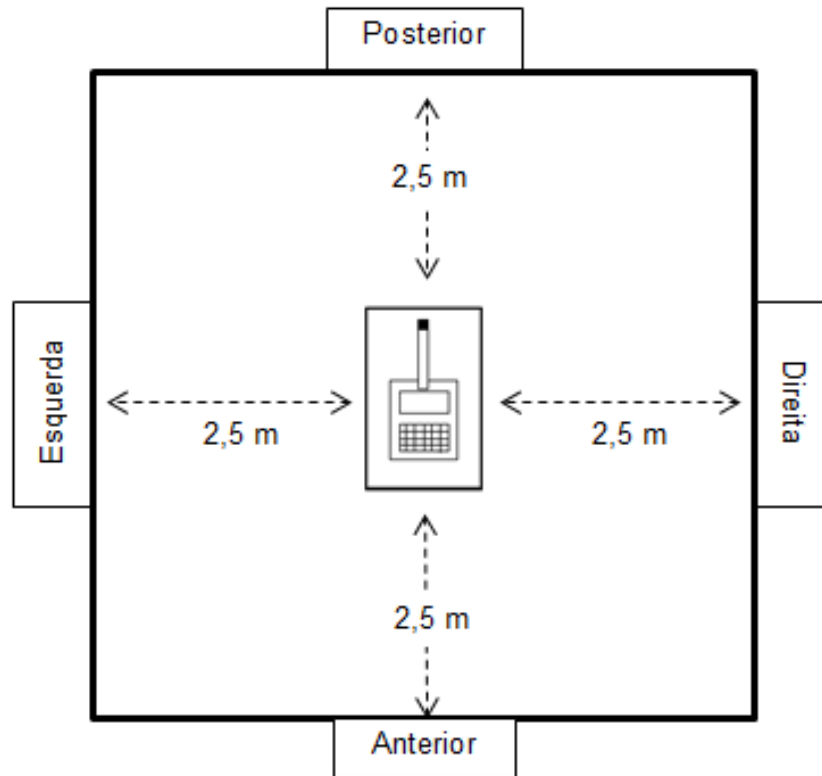


FIGURA 28 – Representação das linhas de isolamento para a avaliação radiológica realizada em campo.

Nas TABELAS 21, 22 e 23, são expostos os valores de taxa de dose (em $\mu\text{Sv/h}$) obtidos na avaliação de campo dos medidores nucleares, no perímetro do isolamento da área (a 2,5 m do centro onde se localizava o medidor nuclear). O levantamento seguiu uma seqüência de medições uniforme para facilitar a coleta dos dados, sendo a primeira bateria de medições feita com os medidores nucleares em posição de transmissão direta, onde foram avaliadas as taxas de radiação gama. Na segunda bateria de medições os medidores nucleares foram postos em posição de retroespalhamento e as medidas foram tomadas também para radiação gama. Na terceira bateria de medições, os medidores nucleares foram mantidos em posição de transmissão direta e, as medidas tomadas foram para radiação de nêutrons.

Neste levantamento foram utilizados os medidores 1, 2 e 3, já relacionados na TABELA 8 e foram feitas um total de 36 medições, sendo 12 para cada medidor.

TABELA 21 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de transmissão direta para avaliação da radiação gama.

Radiação gama em transmissão direta ($\mu\text{Sv/h}$)			
Avaliação	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3
Posterior	0,47	0,49	0,50
Anterior	0,38	0,41	0,43
Esquerda	0,48	0,48	0,49
Direita	0,41	0,39	0,47

TABELA 22 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de retroespalhamento para avaliação da radiação gama.

Radiação gama em retroespalhamento ($\mu\text{Sv/h}$)			
Avaliação	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3
Posterior	0,39	0,39	0,44
Anterior	0,31	0,32	0,33
Esquerda	0,27	0,31	0,29
Direita	0,29	0,32	0,40

TABELA 23 – Resultados obtidos no levantamento de campo com os medidores nucleares em posição de retroespalhamento para avaliação da radiação de nêutrons.

Radiação de nêutrons em retroespalhamento ($\mu\text{Sv/h}$)			
Avaliação	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3
Posterior	0,24	0,21	0,28
Anterior	0,19	0,22	0,30
Esquerda	0,31	0,28	0,32
Direita	0,27	0,30	0,30

O procedimento de coleta das medidas para esta avaliação radiológica feita em campo é ilustrado com a sequência de figuras a seguir, onde são exemplificados os principais pontos de relevância. Uma vez determinado o local onde serão feitas as medições, deve-se isolar a área com fitas e com o símbolo internacional de radiação ionizante, conforme demonstrado na FIGURA 29, para evitar o acesso indevido e, alertar aos demais trabalhadores que possam estar próximos ao local quanto a presença de radiações ionizantes.



FIGURA 29 – Isolamento da área e sinalização com o símbolo das radiações ionizantes.

Enquanto o isolamento da área é feito, é importante manter o densímetro sob vigilância por um dos membros da equipe (FIGURA 30). Caso isso não seja possível, o equipamento deve permanecer trancado, dentro do veículo de transporte, até a hora do uso. Com isso evitam-se acidentes.



FIGURA 30 – Equipamento sob constante vigilância.

Após o isolamento do local, devem ser feitas as medidas da radiação de fundo ainda sem a presença do densímetro na área (FIGURA 31), a fim de evitar possíveis interferências nos níveis de radiação.



FIGURA 31 – Medição da radiação de fundo, gama e nêutrons.

Antes de iniciar a tomada de medidas é preciso calibrar o densímetro. Isto é feito no próprio local das medições com a utilização de um bloco de calibração demonstrado na FIGURA 32. Este bloco é constituído de materiais capazes de blindar tanto radiação gama quanto nêutrons.



FIGURA 32 – Bloco de calibração.

Durante o processo de calibração o densímetro deve permanecer sobre o bloco conforme demonstrado na FIGURA 33.



FIGURA 33 – Calibração do medidor nuclear.

Uma vez calibrado o aparelho, deve-se posicioná-lo no local da medição. Como as medidas por transmissão direta requerem que a sonda contendo a fonte gama entre no solo a profundidades pré-determinadas, é necessário preparar um

canal por onde esta sonda passará. Isto é feito com o auxílio de um gabarito conforme FIGURA 34.



FIGURA 34 – Preparação do local para transmissão direta.



FIGURA 35 – Delimitação do gabarito de perfuração.

Para facilitar o posicionamento do densímetro de modo a permitir que o orifício feito no solo coincida com a saída da sonda gama (FIGURA 36), recomenda-se que se demarquem os limites do gabarito utilizado para perfurar o solo (FIGURA 35).



FIGURA 36 – Sonda introduzida no solo para posição de transmissão direta.



FIGURA 37 – Sonda no nível do solo para posição de retroespalhamento.

Já nas medidas por retroespalhamento, conforme demonstrado na FIGURA 37, não é necessário a preparação do local (orifício no solo), uma vez que tanto a fonte gama quanto a de nêutrons permanecem no mesmo nível dos detectores na base do densímetro.



FIGURA 38 – Avaliação radiológica para nêutrons e gama, respectivamente.

Apesar do densímetro ser capaz de realizar suas medições em um curto tempo (de 1 a 4 minutos dependendo do modelo), recomenda-se que durante a tomada das medidas, o operador permaneça fora da linha de isolamento para minimizar suas doses (princípio da otimização)

Também é necessário que, durante as medições, seja feito o acompanhamento das taxas de dose no perímetro do isolamento (FIGURA 38), com isso se garante que o limite de taxa de dose para público ($0,5 \mu\text{Sv/h}$) sejam respeitado. Caso este limite seja excedido deve-se, imediatamente, parar a operação e recalcular a área do isolamento, refazendo-o.

Terminadas as medidas deve-se certificar que a fonte foi devidamente recolhida. Para isso são feitas aferições no densímetro com a fonte em posição “segura”, isto é recolhida e travada, este procedimento é demonstrado na FIGURA 39.

Após o uso o equipamento deve ser recolhido à sua caixa de transporte e levado para o local de armazenamento.

A utilização deste tipo de equipamento deve ser feita apenas por profissionais devidamente qualificados, que conheçam e saibam dos riscos inerentes ao uso das radiações ionizantes. Deve-se garantir que todos os equipamentos de proteção individual (EPIs) sejam adequadamente utilizados pelos operadores e que as recomendações de segurança sejam seguidas. Além disso, devem sempre acompanhar o densímetro nuclear seu plano de uso (passo-a-passo para utilização

segura) e o guia de emergência (onde são descritos os procedimentos em caso de acidentes ou emergências). (APNGA, 2012)



FIGURA 39 – Medida de confirmação do recolhimento da fonte.

Baseados nos resultados obtidos nesta terceira etapa de nossa avaliação radiológica, apresentados nas TABELAS 21, 22 e 23, concluímos que o isolamento realizado foi suficiente para garantir a segurança do público, uma vez que as taxas de dose encontradas no perímetro do isolamento ficam abaixo da determinada por nossa Agência Reguladora – CNEN, conforme TABELA 7. Sendo assim os medidores nucleares de densidade de solo avaliados estão aptos a serem utilizados em campo, conforme o ponto de vista da proteção radiológica.

4. ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE

Todo profissional que opera um equipamento que possua uma fonte radioativa acoplada deve seguir uma série de normas de segurança. A Norma CNEN NN 3.01 dita as regras para um manuseio seguro das fontes de radiação ionizante no Brasil.

No caso dos medidores nucleares de densidade de solo, por serem equipamentos portáteis e que necessitam transitar em vias públicas para chegarem aos locais das medições, uma série de cuidados adicionais devem ser tomados, conforme descrito a seguir:

Armazenamento Principal – A guarda dos medidores nucleares de densidade de solo deve ser feita em local seguro, longe de áreas com grande circulação e com a devida blindagem inerente, de forma a limitar os níveis de dose no lado externo deste local. Também deve contar com um controle de acesso eficiente e, preferencialmente, que disponha de dispositivos de segurança que impeçam pessoas não autorizadas de chegar ao local.

Armazenamento Provisório – Em alguns casos será necessário que os medidores permaneçam fora de sua instalação de origem durante o tempo necessário para a obtenção das medidas, neste caso deverá ser providenciado um local de guarda temporária que garanta sua segurança física e radiológica. Estes locais geralmente são construídos em um ponto isolado e contam com isolamento físico provido por cercas e arames farpados, além de ficarem trancados com cadeados e correntes. Recomenda-se, também, que se mantenha vigilância constante sobre esses locais de abrigo provisório. (HUMBOLDT, 2012)

Transporte – Como esse equipamento transita em vias públicas e, muitas vezes em horário comercial, os veículos que os transportam devem ser devidamente identificados. A norma brasileira para transportes de cargas perigosas e a Norma CNEN NN 5.01 atribuem a este tipo de equipamento uma série de códigos, à saber: IT, é o índice de transporte, usado para controlar a exposição à radiação; Categoria, relacionada ao nível máximo de radiação e ao IT e; Sinalização. (CNEN, 2012c)

O IT corresponde ao nível máximo de radiação em mSv/h medido a 1 m da embalagem ou fonte. O valor obtido é multiplicado por 100 e é adimensional. No caso dos medidores nucleares de densidade de solo, o IT pode variar de 0 a 1, conforme a quantidade de medidores transportados.

A categoria de transporte, que pode ser I-Branca, II-Amarela, ou III-Amarela, é definida levando em conta 3 fatores: nível de radiação na superfície, índice de transporte e expedições sob arranjo especial, conforme TABELA 24.

TABELA 24 – Categorias de volumes e sobre-embalagens.

Condições		
Índice de Transporte (IT)	Nível de radiação máximo em qualquer ponto da superfície externa (NMR) (mSv/h)	Categoria
IT = 0 ^(a)	NMR ≤ 0,005	I - Branca
0 < IT ≤ 1 ^(a)	0,005 < NMR ≤ 0,5	II – Amarela
1 < IT ≤ 10	0,5 < NMR ≤ 2	III – Amarela
IT > 10	2 < NMR ≤ 10	III – Amarela e sob uso exclusivo ^(b)

Fonte: CNEN, 2012c.

- a) Se o IT medido não for maior que 0,5, o valor fornecido pode ser 0 (zero).
 b) Deve ser transportado sob uso exclusivo.

A categoria para estes medidores nucleares de densidade de solo é 1 branca e a marcação destes equipamentos durante o transporte também deve apresentar algumas características como ser legível, durável, visível e contrastante com o veículo. As dimensões recomendadas para a sinalização destes equipamentos é de 12,5 mm.

Além disso, no veículo de transporte devem estar presentes toda a documentação necessária para o transporte de fontes de radiação (declaração do expedidor, ficha de monitoração de carga e veículo, declaração do transportador, envelope de emergência, certificado da fonte,...) pertinentes ao proprietário e a fonte, além de um livro para registro de ocorrências, os telefones que devem ser acionados em caso de emergências e/ou acidentes e um kit para emergências condizente com o tipo de fonte transportada. (BRUNO, 2012)

5. ACIDENTES OCORRIDOS

Os eventos causadores dos acidentes podem ser previstos, bem como sua probabilidade de ocorrência, porém, não é possível detalhá-los. O não cumprimento dos procedimentos operacionais é a principal causa de sua ocorrência, onde podemos destacar a falta de monitoração de área nos locais de utilização dos medidores nucleares. Porém, os acidentes com medidores e perfilagem de poços de petróleo ocorrem em menor quantidade e gravidade do que em radiografia industrial e irradiadores de grande porte. Abaixo, encontram-se alguns acidentes e lições aprendidas:

Como exemplo de acidente envolvendo um medidor nuclear de densidade e umidade de solo, podemos citar o ocorrido no Reino Unido em 1994. Neste caso o medidor atingido tinha fontes de ^{137}Cs (0,37 GBq) e de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ (1,85 GBq). (CROFT, 1999).

Um rolo compressor passou por cima do medidor esmagando-o e causando dano/defeito, conforme representado na FIGURA 40.



FIGURA 40 – Representação do ocorrido no acidente do Reino Unido em 1994.
Fonte: CROFT, 1999.

A área foi isolada em um raio de 5 metros, físicos foram acionados e os bombeiros retiraram o equipamento, colocando-o dentro de uma caixa e preenchendo a mesma com areia e colocando-a em um depósito. Os físicos não encontraram contaminação na área.

No dia seguinte o supervisor de radioproteção foi até o local e confirmou que não havia contaminação, levou as fontes para descartar posteriormente.

A empresa tomou as seguintes providências: optou por utilizar sinalizador de luz intermitente para o uso do equipamento. A empresa revisou as normas e planos de contingência e deu um curso de treinamento em segurança radiológica para todos da equipe. Não houve ocorrência de doses.

Lições aprendidas: Os operadores devem estar cientes das suas obrigações e não devem deixar os medidores sem supervisão. Os operadores devem ter

conhecimento das normas e planos de contingência, devendo as mesmas serem suficientes para lidar com situações como a citada sem que haja intervenção da autoridade reguladora local (N.A.I.R.). Não é correto despejar material (areia) sobre os medidores danificados, para que não agrave a situação, o certo seria evacuar a área a 2 metros, estabelecer barreiras e entrar em contato com supervisor de radioproteção.

Além de medidores nucleares de densidade de solo, há ocorrências com outros tipos de medidores nucleares e de perfilagem de poços de petróleo que também servem como lições. Seguem alguns acidentes:

- Brasil, 1987 - Medidor de nível em uma Siderúrgica com fonte de Co^{60} (3,34 GBq). (DA SILVA, 2012a)

O coque incandescente foi derramado em cima da blindagem da fonte. O coque foi resfriado e retirado do local, os técnicos da instrumentação foram ao local e constataram visualmente o dano na blindagem.

Foi realizado o isolamento da área, uma blindagem (caixa) de 40 mm de espessura de chumbo foi construída para o resgate da fonte. Após o resgate da fonte, foi realizado um levantamento radiométrico na caixa onde foi armazenada, por um técnico da instrumentação portando o monitor individual de dose, que constatou os seguintes valores de taxa de exposição: a 2 da superfície externa da caixa 0,06 mSv/h e na superfície externa da caixa 0,2 mSv/h.

- Brasil, 1989 - Medidor de nível em uma siderúrgica com fonte de Co^{60} (0,37 GBq). (DA SILVA, 2012a)

Ocorreu o sobre aquecimento da blindagem do medidor durante o processo de manutenção da câmara do sistema de apagamento a seco de coque.

No primeiro dia foi realizado um levantamento radiométrico das fontes e não foi constatada nenhuma anormalidade. No segundo dia deram início ao resfriamento da câmara para a manutenção programada. No quinto dia iniciaram a retirada das fontes, e constataram o acidente.

Foi localizada uma trinca na parede da câmara, abaixo do local de fixação da fonte radioativa. O derretimento da blindagem (chumbo) foi provocado pelo ar quente que fluiu através da trinca. O ponto de fusão do chumbo é de 327°C e do cobalto é $>1.000^{\circ}\text{C}$. Quando o técnico foi retirar a fonte, observou que o cadeado estava travado, para facilitar a abertura do mesmo, apoiou a parte inferior da blindagem com as mãos, para incliná-la e tentar abrir o obturador. Com a abertura do obturador virada para o piso, constatou que o peso era menor e que uma crosta de material (chumbo) tinha sido formada na parte inferior externa da blindagem.

O serviço foi interrompido e a equipe de segurança do trabalho realizou o levantamento radiométrico. Dois técnicos foram expostos à radiação durante 20 minutos quando estavam retirando a fonte, e dentro desse tempo, ficaram 5 minutos junto a fonte.

Foram tomadas as providências para que todos os medidores fossem retirados antes do resfriamento da câmara, antes da manutenção os canais de inspeção próximos a blindagem foram fechados, e foram feitas bases retangulares com 100 mm de concreto refratário e 100 mm de manta isolante sob a fonte. As

frestas foram fechadas para evitar a queda do coque incandescente na região da fonte.

- Reino Unido, 1989 - Medidor de espessura em fábrica de papel com fonte de Kr^{89} (10 GBq). (CROFT, 1999).

O obturador emperrou em posição de feixe livre e o engenheiro de manutenção transportou o equipamento com o feixe primário em direção ao seu corpo.

O engenheiro utilizava dosímetro individual do tipo TLD e a exposição foi localizada. O incidente foi investigado pelo supervisor de radioproteção, que estabeleceu a dose recebida pelo engenheiro na pele de 55,9 mSv.

As seguintes providências foram tomadas: As normas foram modificadas e uma blindagem foi adicionada ao medidor. O engenheiro recebeu treinamento em radioproteção.

Lições aprendidas: Todos os envolvidos, inclusive os engenheiros encarregados pela manutenção dos equipamentos, devem receber treinamento para risco radiológico e medidas preventivas. Deve ser utilizado, em todas as operações, um monitor para confirmar se o obturador está fechado antes de qualquer manutenção ou transporte. No caso em que o obturador esteja com defeito, providenciar uma blindagem temporária. Realizar revisões rotineiras para que não haja necessidade de manutenções emergenciais.

- Reino Unido, 1992 - Medidor de nível com fonte de ^{137}Cs (111 GBq). (CROFT, 1999).

Em um teste de fuga periódico (26 meses) foi constatado um vazamento em uma fonte que tinha em torno de 25 anos. As taxas de dose medidas nas proximidades foram maiores que 5 mSv/h.

A área foi isolada, o fornecedor foi acionado, o medidor foi retirado de operação, e nenhuma contaminação foi encontrada na instalação. O fabricante alegou que a blindagem sofreu corrosão (pelo ar marinho). Nenhuma ocorrência de dose foi constatada.

Lições aprendidas: Todas as fontes que tenham alcançado o limite de sua vida útil ou que estejam deteriorando-se devem ser inspecionadas pelo fabricante/fornecedor ou serem substituídas e, em locais onde as fontes podem ser deterioradas (pelo ar marinho, por exemplo), deve-se levar em consideração menores intervalos de tempo para os testes de fuga.

- Perfilagem de poços de petróleo com medidor de umidade com fonte de ^{137}Cs (56,6 GBq). (DA SILVA, 2012a)

Ao puxar o porta-fonte, a fonte despreendeu-se e rolou pelo chão até um conjunto de canos metálicos. Nesta ocasião não foi utilizado monitor de radiação. Em seguida, ao utilizar o monitor, notou-se a perda da fonte, o supervisor de radioproteção foi então acionado e a fonte recuperada após 8 horas. Os operadores não tiveram doses maiores que a radiação de fundo, pois os canos serviram como blindagem.

Lições aprendidas: As empresas devem assegurar que seus trabalhadores estão aptos e treinados adequadamente para o manuseio das fontes radioativas. O supervisor de radioproteção deve assegurar que os procedimentos são realizados corretamente pelos operadores, neste caso, o uso dos monitores de radiação, e os procedimentos de segurança devem ser revisados regularmente. (CNSN, 2011; FERREIRA, 2012)

As lições aprendidas com os acidentes citados contribuem para uma melhor identificação dos cenários que tenham um potencial de ocorrência de outros acidentes. Nota-se que a maioria poderia ter sido evitado, caso os operadores tivessem seguido os procedimentos de segurança corretamente, como, monitoração das áreas e uso de dosímetro individual, e faltou um treinamento adequado desses operadores, para a garantia da segurança radiológica dos mesmos, e dos outros possíveis trabalhadores envolvidos. A manutenção do equipamento deve ser realizada com frequência, bem como o teste de fuga das fontes periodicamente.

6. CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho percebemos a importância dos medidores nucleares para o desenvolvimento do país. Ficou claro que, dentre as inúmeras aplicações possíveis, os medidores nucleares de densidade de solo representam um papel fundamental em ramos de atividades variadas, principalmente na construção civil e industrial, permitindo avaliar com segurança e precisão as características dos solos a serem utilizados para diversos fins.

Pudemos perceber, também, a importância de se conhecer as características dos equipamentos com os quais trabalhamos. Isso se demonstrou ao realizarmos os levantamentos radiométricos no densímetro nuclear de densidade de solo, os quais nos permitiram, através da caracterização de suas fontes, do conhecimento das normas de segurança e legislação vigente, formular um planejamento seguro das atividades de trabalho envolvendo-os.

Os valores obtidos na avaliação radiológica dos medidores nucleares de densidade de solo se mostraram consistentes com o estabelecido pelo fabricante e dentro dos limites operacionais seguros, de modo que os procedimentos adotados e seguidos nas três etapas desta avaliação radiológica, objetivo principal deste trabalho, se mostraram promissores e capazes de integrar um plano definitivo para este tipo de avaliação.

O setup de demonstração para a avaliação de contaminação (teste de esfregação) serviu de aprendizado, principalmente para entendermos e avaliarmos sua importância, devendo também fazer parte de uma rotina de treinamento obrigatória para os envolvidos e, garantindo desta forma a minimização de riscos inerentes ao uso das radiações ionizantes.

Por fim, ao avaliarmos alguns relatos de acidentes ocorridos com medidores nucleares, observamos que o conhecimento obtido através destes, pode contribuir muito na elaboração de novas normas de segurança e de critérios de utilização, como a exigência de um treinamento específico para todos os funcionários envolvidos nestas atividades, sendo fundamental para a segurança de todos.

7. RECOMENDAÇÕES

Como recomendações finais, sugerimos o desenvolvimento de um setup de demonstração para o medidor nuclear de densidade de solo, que permita realizar levantamentos radiométricos neste aparelho simulando diversos solos, com densidades variadas e, a realização de um setup para o teste de esfregaço na fonte de nêutrons, presente no interior deste tipo de medidor nuclear.

Recomendamos, também, que se faça uma avaliação de risco para exposição dos membros inferiores, expostos ao feixe de radiação primário durante o deslocamento do medidor, visto que essas foram as medidas mais elevadas encontradas ao longo desta avaliação radiológica e, por não fazerem parte dos níveis estabelecidos pelo fabricante.

Recomendamos por fim, que se realize uma avaliação visual da integridade do canal da fonte de ^{137}Cs , bem como da blindagem interna da fonte de $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$, utilizando o endoscópio industrial disponível no laboratório de indústria do IRD.

Com estas recomendações buscamos estabelecer padrões de segurança ainda mais acurados, desenvolver as tecnologias de radioproteção e dosimetria, e estimular o crescimento dos profissionais na busca de seu contínuo aprendizado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APNGA – American Portable Nuclear Gauge Association. **Manual**. Disponível em: <http://www.apnga.com/index.html>. Acesso em: 19 de junho de 2012.

BRUNO, Natanael. **Transporte de Materiais Radioativos**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 214 fls. Notas de aula, 2012.

CNEN. **CNEN-NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=301>. Acesso em 27 de julho de 2012a.

CNEN. **CNEN-NE 3.02 – Serviços de Radioproteção**. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=302>. Acesso em: 06 de setembro de 2012b.

CNEN, **CNEN-NE 5.01 – Transporte de Material Radioativo**. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=501>. Acesso em: 06 de setembro de 2012c.

CNEN. **CNEN-Res 112/11 – Licenciamento de Instalações Radiativas**. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=602>. Acesso em: 06 de setembro de 2012d.

CNEN. **Entidades Autorizadas e Registradas**. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/cons-ent-prof/entidades-aut-cert.asp>. Acesso em: 02 de setembro de 2012e.

CNSC – Canadian Nuclear Safety Commission. **Preventing Portable Gauge Accidents**. DNSR Newsletter: CNSC, 2011.

CROFT, J, R et al. **IRID: Ionising Radiations Incident Database**. NRPB, 1999.

DANTAS, Ana Letícia. **Avaliação de Exposições Internas e Externas**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 409 fls. Notas de aula, 2012.

DA SILVA, Francisco Cesar. **Acidentes Radiológicos com Medidores Nucleares e Perfilagem de Poços de Petróleo**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 21 fls. Notas de aula, 2012a.

DA SILVA, Francisco Cesar. **Medidores Nucleares de Solo**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 69 fls. Notas de aula, 2012b.

FERREIRA, Paulo. **Proteção contra a Exposição Ocupacional**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 336 fls. Notas de aula, 2012.

HUMBOLDT - Medidores de Control de Compactación. **HS-5001EZ Medidor de Densidad/Humedad - Guia del Usuario**. Disponível em: <http://www.humboldtmg.com/c-1-p-2-id-1.html>. Acesso em: 31 de maio de 2012.

IAEA - Categorization of Radioactive Sources, Safety Standards Series No. Rs-G-1.9; 2005

LOURENÇO, Manoel. **Medidores Nucleares**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 69 fls. Notas de aula, 2012.

MACEDO, José Ronaldo; PIRES, Luiz Fernando; CORRECHEL, Vladia. **Atenuação da radiação gama**. CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura. USP – Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.

PATTROL. **Densímetro Nuclear**. Disponível em: http://www.pattrol.com.br/?page_id=146. Acesso em: 04 de maio de 2012a.

PATTROL. **Licença CNEN**. Disponível em: http://www.pattrol.com.br/?page_id=559. Acesso em: 06 de setembro de 2012b.

PATTROL. **Atividades**. Disponível em: http://www.pattrol.com.br/?page_id=109. Acesso em: 13 de setembro de 2012c.

PEREIRA, Walsan Wagner. **Grandezas e Medidas**. Curso de Pós-Graduação em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas. IRD/AIEA. De 04.12 à 09.12.2009. 273 fls. Notas de aula, 2012.

TERREMOTO, Luís Antônio Albiac. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear Reatores**. IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo: IPEN/CNEN, 2004.

TROXLER. **Manual of Operation and Instruction – Model 3430-40 Plus & 3440 Plus Surface Moisture-Density Gauge**. Disponível em: http://www.troxlerlabs.com/downloads/pdfs/3430-40/3430-40plus_manual.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2012a.

TROXLER. **Sealed Source Leak Testing**. Disponível em: <http://www.troxlerlabs.com/safety/leaktest.php#instructions>. Acesso em: 02 de junho de 2012b.

UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. Rio Grande do Sul: UFRS, 2006.