

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Sonda Nuclear para medida da umidade de solos por
Espalhamento Compton

Aluno: Márcio José de Aguiar
Orientador: Clemente José Gusmão Carneiro da Silva

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Sonda Nuclear para medida da umidade de solos por Espalhamento Compton

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

ÁREA: Aplicações das Radiações
Radioproteção e Instrumentação Nuclear

Orientador: Clemente José Gusmão
Carneiro da Silva
Universidade Federal de Minas Gerais

MÁRCIO JOSÉ DE AGUIAR

Belo Horizonte – MG

Agosto – 2006

*Dedico este trabalho à minha esposa Elizabeth
e aos meus filhos Eberth e Leandro.*

AGRADECIMENTOS

Após o término desta dissertação, surge a recordação de todos os que possibilitaram, com sua ajuda, esta realização tão importante para a minha vida profissional.

A recordação é um movimento da sensibilidade, que traz a emoção e a gratidão a todos os familiares, amigos e professores que colaboraram neste esforço por mim realizado para aquisição de conhecimentos dentro da área Nuclear.

Os agradecimentos que faço aqui representam uma homenagem sincera, deixando destacados neste trabalho os seguintes nomes e instituições:

Professor Clemente José Gusmão Carneiro da Silva, por sua orientação precisa e constante assistência;

Professor Arno Heeren de Oliveira, por seu apoio e incentivo;

Professores Cláudia Pereira Bezerra Lima e Tarcísio Passos Ribeiro de Campos, por seus ensinamentos;

Professor Inácio de Loiola Pereira Campos, por seu incentivo na realização deste trabalho;

Ao amigo e grande colaborador Mário Roberto de Souza Silva;

Aos caros colegas do grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia Nuclear da **UFMG**, Rodrigo Penna, Paulo Porto, Antônio Lúcio, Cibele, Gustavo;

A todas as funcionárias do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, nominalmente, Márcia B. S. Rosa, Nanci M. Afonso e Bernadete pela dedicação e atenção, procurando ajudar-nos em tudo o que precisamos;

Aos professores e funcionários da **Universidade FUMEC** por todo apoio;

Ao Departamento de Estradas de Rodagens de Minas Gerais (DER/MG) pela disponibilidade de seus laboratórios e amostras de solo para as pesquisas deste trabalho;

Ao Chefe dos Laboratórios do DER/MG, engenheiro José Flávio do Nascimento e do laboratorista Sebastião Donizetti Nogueira pelo apoio técnico nas pesquisas realizadas;

E, finalmente, à querida esposa Elizabeth e aos queridos filhos Eberth e Leandro e demais familiares pelo permanente incentivo e colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
INTRODUÇÃO.....	IX
I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
I-1 Métodos não nucleares de medida de umidade de solo.....	11
I-2 Métodos baseados na moderação de nêutrons.....	12
I-3 Fundamentos Teóricos do Espalhamento Gama	13
I-4 Métodos baseados na interação da radiação gama com a matéria.....	16
I-5 Guia líquido	18
I-6 Cintiladores.....	20
II. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
II-1 Arranjo Experimental	21
II-2 A fonte de Amerício-241	21
II-3 O cintilador plástico do experimento	23
II-4 Guia líquido de luz	24
II-5 Acoplamento do Guia Líquido à Fotomultiplicadora.....	27
II-6 Amostras de solos.....	28
II-7 Experimentos.....	30
II-7.1 EXPERIMENTO 1: Influência do volume de solos nas contagens	30
II-7.2 EXPERIMENTO 2 : Ensaio da técnica de espalhamento utilizando ângulo de 90° entre fonte e detector.	31
II-7.3 EXPERIMENTO 3: Medida de umidade com sonda nuclear e guia líquido	32
III. RESULTADOS	36
III-1 Contagens obtidas para variação no volume de solo.....	36
III-2 Contagens obtidas para variação na umidade do solo na técnica de espalhamento com detector a 90°	38
III-3 Medida de umidade com sonda nuclear e guia líquido	40
IV. CONCLUSÕES.....	41
V. PERSPECTIVAS	42
VI. LITERATURA CONSULTADA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do efeito foto-elétrico (Tauhata <i>et al.</i> , 2003).....	13
Figura 2. Representação esquemática do Espalhamento Compton (Tauhata <i>et al.</i> , 2003).	14
Figura 3. Contribuição dos diversos efeitos produzidos pela interação da radiação num material para o coeficiente de atenuação linear total (Tauhata <i>et al.</i> , 2003).	17
Figura 4. Espalhamento coerente (Bushberg <i>et al.</i> , 2002).....	18
Figura 5. Detalhes de construção e dimensões da fonte de Amerício-241. (Catálogo Amersham)	22
Figura 6. Esquerda: cintilador orgânico inteiro e um cortado ao meio, para ser usado e polido antes de sua utilização; direita: cintiladores orgânicos utilizados no experimento (Silva, 2004).	24
Figura 7. Esquerda - detalhe da ponta de um guia líquido; direita - um guia líquido de 3 metros de comprimento (Silva, 2004).	25
Figura 8. Acoplamento entre a fotomultiplicadora e o guia-líquido de luz.....	28
Figura 9. Da esquerda para a direita, silte, saibro e arenito. O último recipiente contém água, para os experimentos com umidade.....	29
Figura 10. Amostras de solo utilizadas no experimento.....	29
Figura 11. Experimento para medida da influência do volume de solo no espalhamento da radiação.....	30
Figura 12. Montagem do experimento 1, com fonte abaixo, dentro da blindagem, e detector à direita.	31
Figura 13. Centralização do detector em relação à amostra.	31
Figura 14. Acréscimo de água nas amostras de solo.	32
Figura 15. Montagem da sonda para introdução no solo, sem a fonte.	33
Figura 16. Esquema para medida da densidade com sonda introduzida na amostra de solo.	34
Figura 17. Amostras de solo com umidade determinada.	35
Figura 18. Gráfico das contagens <i>versus</i> altura para os dois tipos de solo.....	36
Figura 19. Regressão para os dados das contagens do silte.....	37
Figura 20. Regressão para os dados das contagens do saibro.	37
Figura 21. Gráfico das contagens <i>versus</i> umidade no silte e no saibro.....	38
Figura 22. Contagens normalizadas para o solo seco.....	39
Figura 23. Gráfico das contagens <i>versus</i> umidade obtidas com a sonda nuclear.....	40

RESUMO

Sonda Nuclear para medida da umidade de solos por espalhamento Compton

Dois métodos para medir umidade do solo foram desenvolvidos. Ambos usando uma fonte de Amerício-241 e espalhamento Compton coerente e incoerente. O primeiro método usa amostras de solo de volumes menores que 4 cm^3 . Quando um feixe de radiação gama de 60 keV atinge as amostras de solo, a radiação é espalhada e medida com um detector de raios X NaI(Tl). Pequenas quantidades de água são progressivamente adicionadas em cada amostra de solo fazendo-se variar a umidade até a saturação. A umidade é correlacionada com o número de contagens. Os resultados mostraram a viabilidade de se usar esta técnica para medir a umidade de pequenas amostras de solo.

Um segundo método para medição da umidade utiliza amostras cilíndricas com raio de 10 cm e altura de 15 cm. A sonda é composta de cilindro de alumínio de comprimento de 5 cm onde estão posicionadas axialmente uma fonte de Amerício-241, uma blindagem de chumbo e um cintilador plástico. Este detector é acoplado à um guia de luz e este ao fotocatodo de um tubo fotomultiplicador. A sonda foi testado usando amostras de solo com umidades variando de 5 até 25 %. Correlações lineares entre contagens e umidade mostraram valores de coeficientes de correlações melhores do que 0,99.

ABSTRACT

Nuclear probe for soil water content measurements by Compton scattering

Two methods for measuring soil moisture were developed. Both methods use a source of ^{241}Am and are based on incoherent and coherent Compton scattering. The first one uses soil samples smaller than 4 cm^3 . A beam of gamma rays of 60 keV reached these samples and scattered radiation were measured using a X-Ray NaI(Tl) detector. Adding progressively small amount of water into this until saturation had permitted to correlate variation of counts with water content variations. The results has shown the viability of using this method to measure soil water content.

A second method uses cylindrical soil samples with radius of 10 cm and height of 15 cm and an axial hole de 1.2 cm of diameter and 9 cm depth. This densimeter is a cylinder of five centimeter length where Inside is placed axially a ^{241}Am source, a lead shield and a plastic cintilador. The detector is coupled to a light guide and this to photomultiplier tube. The densimeter was tested using soil samples where water contents ranges from 5 to 25% . Linear correlation of counts and water content has shown correlation coefficient better than 0.99 .

INTRODUÇÃO

A presença de água no solo é um fator determinante no desenvolvimento das culturas. Uma carência de água afeta o crescimento das plantas. Por outro lado, excesso de umidade pode provocar os mesmos efeitos. Assim, existe uma faixa de umidade ideal que é objeto de controle e planejamento numa agricultura cada vez mais competitiva.

Além disto, na Engenharia, a umidade é um parâmetro importante durante a fase de compactação do solo nas obras de terra. A estabilidade e a resistência das estruturas de terra em Engenharia têm uma relação direta com a mesma.

A umidade no solo é um parâmetro relevante e sua medida pode ser realizada através de métodos destrutivos e não destrutivos. Estas medições podem ser efetuadas utilizando técnicas nucleares ou não.

As medidas da umidade mássica e volumétrica de solos são obtidas pela razão entre a massa (ou volume) de água do solo úmido e a massa (ou volume) do solo seco. Pode-se medir a massa (ou volume) de água de um solo pela diferença dos pesos da amostra úmida e dessa amostra depois de seca em estufa a 105 °C durante 24 horas. Sendo a densidade da água igual a 1 g.cm^{-3} a massa de água em gramas é numericamente igual ao seu volume em mL^{-1} . Assim, a umidade do solo pode ser determinada tanto em percentual de massa quanto em percentual de volume.

Técnicas nucleares também podem ser utilizadas nas determinações de umidade de solos. Uma das mais comuns e importantes é a técnica de moderação de nêutrons rápidos (Kinght & Wright, 1954; Holmes, 1955; Stewart & Taylor, 1957). Ela consiste de uma fonte de nêutrons rápidos, um detector de neutrons térmicos. Um nêutron rápido pode sofrer choques sucessivos, tornar-se térmico e atingir o detector produzindo um pulso elétrico. Este pulso é então contado pelo sistema eletrônico associado. A densidade de neutrons medida pela taxa de contagens é uma função da umidade do solo (Jansson, 1999; Randrup & Lichter, 2001). A partir da curva de calibração, as contagens dos nêutrons térmicos fornecerá valores de umidade (Silva, 2004; Teixeira, 2005).

Diferentes tipos de solo apresentam distintas composições química, granulométrica e compactação natural. Porém, no tocante à umidade, tais variações, em geral, têm pouca influência sobre a curva de calibração, pois os nêutrons são moderados principalmente pela presença da água.

Outra técnica nuclear para a medida de umidade é a de transmissão gama. Em laboratório, faz-se um feixe colimado de radiação atravessar uma amostra de solo (Borges *et al.*, 1999). Tanto sua densidade quanto sua umidade afetam a atenuação da radiação (Zazueta & Xin, 1994).

Por fim, uma nova alternativa entre as técnicas nucleares para a realização destas medidas é utilizar o espalhamento Compton. Neste tipo de efeito, a radiação interage com a matéria espalhando fótons de energia menor que os incidentes. Essa interação dependerá da composição da amostra de solo, pois o efeito Compton está relacionado ao tipo de material, ao seu número atômico e a sua densidade. Uma sonda introduzida em uma amostra de solo, levando uma fonte de radiação gama e um detector apropriado pode fazer as contagens dos fótons espalhados. Para um solo de mesma composição e densidade, estas contagens dependem somente da umidade do solo. O objetivo principal deste trabalho é construir uma sonda para medição da umidade do solo pela técnica do espalhamento Compton.

I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I-1 Métodos não nucleares de medida de umidade de solo

A principal técnica para determinar-se o teor de água no solo é a técnica gravimétrica. Ela é padrão para calibração de todas as outras técnicas de determinação de umidade em solos. Nela, determina-se a massa de solo úmido M_u numa balança analítica e, em seguida, coloca-se o solo na estufa à temperatura de 105 °C para ir secando até que se obtenha uma massa constante (Holmes, 1958; Gardner, 1986). Obtém-se a massa de água M_w dada pela diferença entre a massa de solo úmido M_u e a massa de solo seco M_s . A relação entre a massa de água e a massa de solo seco em estufa é chamada de umidade mássica ou umidade na base de peso. A relação entre volume de água e volume de solo seco, é denominada de umidade volumétrica ou umidade na base de volume. A partir destas definições podem-se estabelecer as fórmulas associadas às umidades mássica θ_m e volumétrica θ :

A conversão de uma base para outra é obtida dividindo-se a equação (2) pela equação (1):

$$\theta_m = M_w / M_s \quad (1)$$

$$\theta = V_w / V_s \quad (2)$$

$$\theta = \theta_m \cdot \rho_g / \rho_w \quad (3)$$

onde: V_w e V_s são, respectivamente, os volumes de água e de solo.

$\rho_w = M_w/V_w$ é a densidade da água

$\rho_g = M_s/V_s$ é a densidade global (ou densidade aparente) do solo seco.

A principal vantagem do método gravimétrico é que a amostragem é feita por trados, ferramentas de torção que entram no solo retirando uma amostra. É um método de baixo custo e que apresenta a facilidade do cálculo do teor de água obtido pelas expressões simples mostradas acima. Já a sua maior desvantagem é de ser uma técnica destrutiva, não permitindo determinar as variações do teor de água do solo em um mesmo ponto, por exemplo, durante todo o ciclo de uma cultura.

Considerando as técnicas não nucleares, uma das mais importantes é a que utiliza a constante dielétrica dos solos e sua variação na presença de umidade. Essa técnica é chamada de TDR (Time-Domain Reflectometry). Já foi demonstrado que a constante dielétrica varia fortemente com o teor de água e varia pouco com a densidade, textura e não depende significativamente da temperatura (Topp *et al.*, 1980).

I-2 Métodos baseados na moderação de nêutrons

O principal método nuclear para determinação do teor de água do solo é a técnica de moderação neutrônica. Nela uma fonte emite nêutrons rápidos que são moderados por choques com átomos de hidrogênio da molécula da água contida no solo, formando uma densidade de nêutrons térmicos em torno dessa fonte (Waksman *et al.*, 1938). Um detector sensível somente aos nêutrons térmicos, do tipo BF₃ ou He³, é colocado à distância de alguns milímetros da fonte de Am-Be mede a taxa de reações nucleares exoérgicas no B-10 ou no He-3. Essa taxa de reações nucleares pode ser considerada proporcional ao número de átomos de hidrogênio por cm³ de solo. Isto é, considerando a predominância do hidrogênio proveniente da água do solo, pode-se determinar uma relação linear entre a taxa de reações nucleares e a umidade do solo (Belcher *et al.*, 1950).

Com este equipamento, após a elaboração de uma curva de calibração da contagem *versus* umidade do solo, pode-se determinar a umidade em qualquer profundidade do perfil do mesmo em condições de campo, de maneira não destrutiva. O número de nêutrons detectados é diretamente proporcional à umidade do solo (Randrup & Lichter, 2001).

Outros fatores que afetam a precisão do método são a quantidade de matéria orgânica contida no solo e a presença de outros elementos químicos que influenciam a moderação dos nêutrons e o material do tubo de acesso, que dificultam a obtenção da curva de calibração (Cotecchia *et al.*, 1968).

I-3 Fundamentos Teóricos do Espalhamento Gama

Os fundamentos teóricos da interação da radiação com a matéria são descritos por vários autores (Knoll, 1989). De maneira geral, pode-se considerar o número atômico dos elementos químicos constituintes da amostra e a massa específica como os fatores predominantes nas medidas de atenuação da radiação ionizante. A interação da radiação com a matéria pode resultar em três fenômenos principais:

- Efeito fotoelétrico: é a interação em que o fóton incidente desaparece. No seu lugar, aparece um fotoelétron, elétron da camada do átomo absorvedor, com a energia cinética dada pela energia do fóton incidente menos a energia de ligação deste elétron na sua camada original (**Figura 1**). Para a energia típica da radiação gama, o fotoelétron tem a tendência de emergir da camada K, onde a energia é da faixa de keV, para materiais de baixo número atômico, Z, a dezenas de keV, para materiais de alto número atômico;

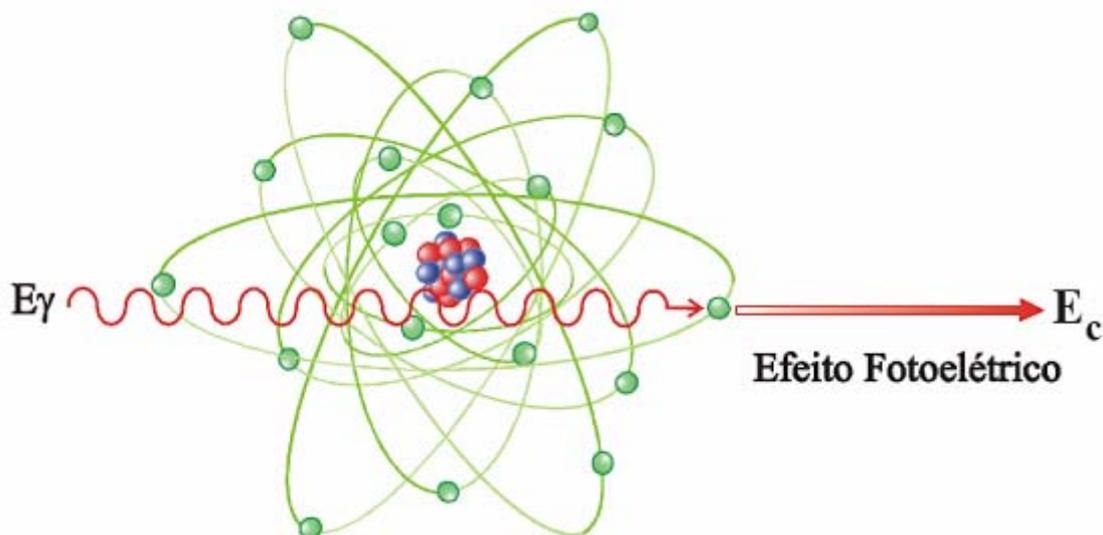


Figura 1. Esquema do efeito foto-elétrico (Tauhata et al., 2003).

- Efeito Compton: ocorre quando um fóton encontra elétrons livres ou de pequena energia de ligação. Nesse efeito o fóton cede parte de sua energia ao elétron em forma de energia cinética (**Figura 2**). A diferença entre a energia do fóton incidente e a de ligação do elétron é então transportada por um fóton secundário.

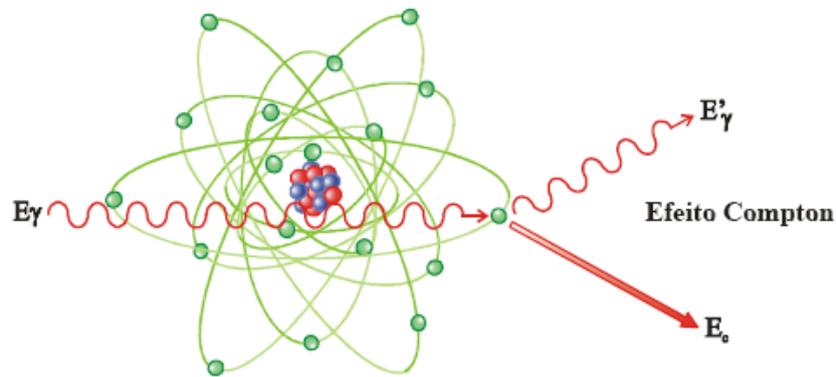


Figura 2. Representação esquemática do Espalhamento Compton (Tauhata *et al.*, 2003).

- Efeito de criação de pares: ocorre quando uma radiação com energia maior do que $2m_0c^2$ onde m é a massa de repouso do elétron e c a velocidade da luz. Este efeito produz um par elétron/positron onde cada uma dessas partículas tem energia igual cinética à metade da diferença entre a energia do fóton incidente menos $2m_0c^2$.

$$E_c = \frac{(E_i - 2m_0c^2)}{2}$$

A combinação destes três efeitos conduz ao fenômeno de atenuação. Dado um feixe inicial de I_0 de fótons de energia $h\nu$ pode-se calcular o número I de fótons que atravessa o material de densidade ρ e de espessura x pela equação:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_T \cdot x}$$

onde μ é o coeficiente de absorção mássico do material, e representa a soma de três efeitos.

Outra técnica de medida da densidade de materiais está baseada na difusão de fótons por efeito Compton. A **Figura 2** ilustra esquematicamente o processo de espalhamento Compton. Este método foi desenvolvido pela primeira vez para a determinação de umidade e densidade de solos e rochas (Belcher *et al.*, 1950b).

Praticamente todos os tipos de equipamentos nucleares sofreram modificações principalmente na eletrônica de aquisição de dados. Porém, os princípios básicos das medidas de umidade e densidade são baseados na difusão e na atenuação das radiações nucleares. Os tipos de equipamentos baseados no espalhamento da radiação gama são os mais usados para as medidas de densidade superficiais e também em perfis de densidade em função da profundidade de solos. O método utiliza como fenômeno primário, o

espalhamento Compton. Os fótons oriundos da fonte e que sofrem efeito Compton produzem os chamados fótons secundários. Estes fótons secundários podem novamente sofrer efeito Compton produzindo fótons terciários e assim por diante. Uma fração de todos estes fótons espalhados se dirige para o detector.

No efeito Compton, a relação que define a energia do fóton espalhado, em função do ângulo de espalhamento, em uma dada interação da radiação com um elétron orbital é baseada nas equações de conservação de energia e de momentum. Ela pode ser escrita como:

$$E' = \frac{E}{1 + \left(\frac{E}{E_0}\right)(1 - \cos \alpha)}$$

Onde:

E' , E , E_0 são respectivamente, as energias das radiações espalhada, incidente e da energia de repouso do elétron (0,511 MeV), e α o ângulo de espalhamento. A energia E' pode variar desde E , para $\alpha = 0$ (quando não ocorre interação), até um valor mínimo, quando $\alpha = 180^\circ$.

A utilização de detectores de alta eficiência não representa uma limitação dessa técnica. Nesses detectores a fração do espalhamento do sistema de transmissão γ é função da geometria, isto é, da distância entre a fonte e o detector. Isto poderia ser tratado introduzindo-se um coeficiente de atenuação efetivo (μ_{ef}), que é menor do que o coeficiente de atenuação teórico devido aos fótons espalhados, mantida assim a validade da lei exponencial da atenuação. O μ_{ef} é específico para cada geometria fonte/detector e cada montagem.

I-4 Métodos baseados na interação da radiação gama com a matéria

Outro método nuclear para determinação da umidade do solo baseia-se nos processos de interação da radiação gama com a matéria, em que um feixe colimado de raios gama atravessa um determinado material. Alguns raios passam sem sofrer qualquer interação com o meio enquanto outros interagem e são espalhados por ele. Esta interação se dá com os elétrons orbitais dos átomos através de espalhamento Compton, e do efeito fotoelétrico (dependendo das densidades dos elétrons, no material absorvedor (Knoll, 1989)). O método consiste em comparar as intensidades dos feixes de raios γ com e sem, absorvedor. Esta técnica tem sido usada em condições de laboratório para a determinação de parâmetros físico-hídricos do solo e também para validar modelos de simulação da dinâmica da água em colunas de solo (Ayers & Bowen, 1985; Gameda *et al.*, 1987; Zazueta & Xin, 1994).

Desde a década de 50 a atenuação de radiação gama tem sido utilizada no estudo das propriedades de diversos materiais, inclusive na determinação da umidade e densidade de materiais/solos (Belcher *et al.*, 1950a). Trabalhos realizados por Gurr & Kirkham e Gardner, entre outros, mostraram a viabilidade de se utilizar este método para avaliação da umidade em solos. (Gardner & Kirkham, 1952; Gurr, 1959). Singh & Kumar, através de um arranjo experimental utilizando um cristal NaI(Tl), realizaram um estudo em solos argilosos e arenosos com diferentes compactações e umidades. Neste trabalho, concluíram que o método da transmissão gama para o estudo das características do sistema solo-água é viável e preciso (Singh & Kumar, 1988).

O número de interações da radiação com o sistema solo-água irá depender da umidade do solo e sua densidade. O aumento da umidade do solo diminui a quantidade de radiação que atravessa o meio. Pode-se, portanto, relacionar a taxa de contagem de um medidor de radiação gama com o teor de água do solo por meio de uma curva de calibração quando se considera a matriz do solo invariável. Os fatores predominantes na precisão e na resolução desse método dependem da geometria do arranjo experimental, da eficiência do sistema de detecção e da atividade da fonte de radiação (Gardner, 1986).

A possibilidade de aplicar o método de espalhamento Compton para a medida de umidade pode ser analisada nas considerações abaixo. Quando a energia das fontes

emissoras de radiação gama diminui, pode-se demonstrar que o número de fótons espalhados por efeito Compton tendem a aumentar (**Figura 3**).

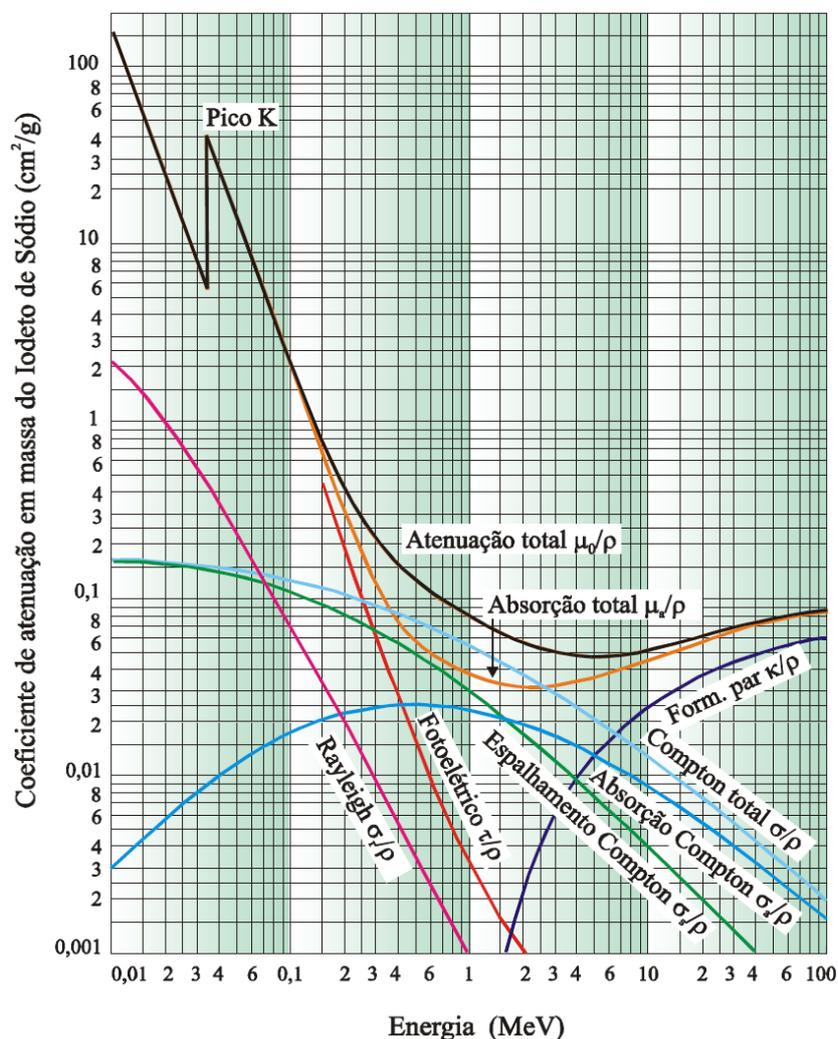


Figura 3. Contribuição dos diversos efeitos produzidos pela interação da radiação num material para o coeficiente de atenuação linear total (Tauhata *et al.*, 2003).

Esse espalhamento depende do número atômico Z do meio e da energia da radiação incidente, podendo tornar-se significativo para materiais de baixo Z e para fótons de baixa energia (Knoll, 1989). Assim, o aumento da umidade em uma amostra de solo deve causar um aumento do número das contagens espalhadas, pois oxigênio e hidrogênio são elementos leves em relação à maioria dos elementos do solo.

O interesse crescente no campo chamado “técnicas analíticas nucleares” incluem espalhamento coerente e incoerente de fótons. Este método é tipicamente usado para determinações densitométricas (Stalp & Mazess, 1980; Gigante & Sciuti, 1985; Tartari *et al.*, 1991). No espalhamento coerente, os fótons incidentes interagem e excitam o

átomo totalmente, ao contrário do que ocorre com o espalhamento Compton ou no efeito fotoelétrico.

Durante o espalhamento coerente o campo elétrico da onda eletromagnético do fóton incidente perde energia, fazendo oscilar em fase todos os elétrons do átomo (Bushberg *et al.*, 2002). Os elétrons do átomo imediatamente irradiam emitindo o fóton de mesma energia, mas em uma direção diferente (**Figura 4**). Em geral, o ângulo de dispersão aumenta à medida que a energia do fóton diminui. Em imagens médicas, a detecção dos raios X dispersos terá um efeito prejudicial na qualidade da imagem. Porém, é importante fonte de informação da densidade do meio onde ocorreu o espalhamento Compton.

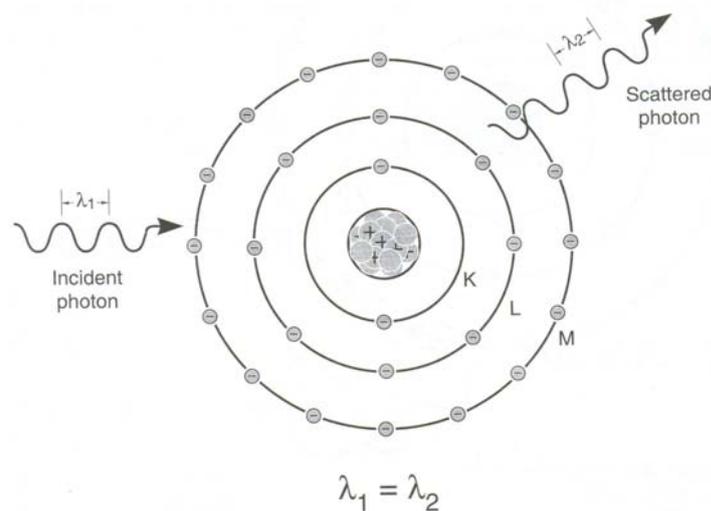


Figura 4. Espalhamento coerente (Bushberg *et al.*, 2002).

O diagrama demonstra que o fóton incidente de comprimento de onda λ_1 , interage com o átomo enquanto o fóton espalhado λ_2 está sendo emitido com aproximadamente o mesmo comprimento de onda e energia.

O sistema de medição de umidade, baseado no espalhamento coerente e incoerente da radiação é composto de uma fonte, cintilador plástico, guia de luz e unidade de aquisição de dados.

I-5 Guia Líquido

Os guias líquidos de luz foram estudados pela primeira vez em meados do século XIX. No final desse século já era conhecida a transmissão de luz por reflexão total em tubulações de água e sua aplicação em fontes luminosas. Porém, somente em 1970 nos Estados Unidos, Inglaterra e Austrália se considerou a possibilidade do uso de guias líquidos de luz como meios de comunicação. Vários estudos foram desenvolvidos utilizando tubinhos de vidro preenchidos com líquidos com índices de refração maiores que os do vidro. Esses guias são chamados de “liquid-core optical fiber (LCOF)”- LC. Eles funcionaram muito bem mostrando perdas inferiores a oito dB/km na região do infravermelho, porém são ineficientes quando comparados com as fibras óticas de vidro.

Esses guias foram investigados por vários autores (Altkorn *et al.*, 1997; Dress & Franke, 1997; Altkorn *et al.*, 1999). Em consequência foram desenvolvidas resinas de teflon com coeficientes de refração que permitiam a construção de LCOF's. Franke mostrou que os tubos de vidro revestidos internamente com o Teflon AF 2400, cujo coeficiente de refração é de 1,29, permitiam a transmissão de luz com elevada eficiência.

Apesar de menos eficientes que as fibras óticas, demonstrou-se que eles poderiam ter uma grande potencialidade de aplicações em outras áreas. O fator limitante do uso das LCOF é o índice de refração do vidro que impede o uso da maioria dos líquidos, inclusive a água, metanol, etanol entre outros. Esses líquidos têm índices bem abaixo daqueles do vidro, não permitindo assim a ocorrência de reflexão total no interior do tubo de vidro.

A partir de 1970, houve um grande interesse nas pesquisas dos guias de luz baseados em tubos de metais altamente reflexivos. Estes guias ainda são usados na transmissão de fótons nas faixas das microondas e do infravermelho e têm a vantagem de conduzir a luz através do líquido no interior dos tubos metálicos podendo coletar essa luz em grandes ângulos. Porém apresentam uma eficiência muito aquém dos guias líquidos de luz baseados na reflexão total (LCOF).

Atualmente, os únicos plásticos comercialmente disponíveis capazes de guiar a luz através da água são produzidos pela DuPont e são chamados de Teflon AF. Esses materiais têm uma excelente transparência e índices de refração muito baixos ($n = 1,31$ para o Teflon AF 1600 e 1,29 para o Teflon AF 2400). O índice de refração do Teflon AF 2400 é mais baixo do que quase todos os líquidos em condições normais de temperatura e pressão. Essas resinas fabricadas pela Dupont podem ser transformadas em tubos, tarugos, discos, ampliando consideravelmente as aplicações das LCOF's. Os

tubos de teflon AF são encontrados comercialmente com diversos diâmetros internos. Eles podem transmitir a luz visível com baixas perdas quando preenchido com líquidos de baixo índice de refração tais como a água, etileno glicol, metanol e etanol.

As duas aplicações do uso dos guias líquidos nas pesquisas estão principalmente na espectroscopia de fluorescência Raman e de absorvância (Altkorn *et al.*, 1997).

O Teflon AF pode ser considerado uma nova geração de resinas de elevado desempenho. Eles apresentam, além de elevada transparência e resistência mecânica, alta permeabilidade para gases e baixa condutividade térmica. As propriedades das resinas de Teflon AF, têm as suas potenciais aplicações detalhada no artigo (Waterbuy *et al.*, 1997).

I-6 Cintiladores

Os cintiladores são constituídos de materiais que produzem luz quando excitados pela passagem de partículas carregadas e devido a sua maior densidade são mais eficientes para a detecção de radiação γ , do que os detectores gasosos. Além disso, também medem a energia da partícula detectada (Knoll, 1989).

Quando fótons incidem sobre um cintilador, ocorrem interações do tipo Compton e os elétrons resultantes dissipam sua energia no cintilador. Parte desta energia é convertida em fótons de luz e o restante da energia é dissipada em forma de calor gerado pelas vibrações da rede cristalina. Os fótons emitidos pelo cintilador, devido à fluorescência, estão na faixa da luz visível (400 a 700nm) (Knoll, 1989).

Para converter este pulso luminoso em um pulso elétrico, é utilizado um tubo fotomultiplicador. O tubo fotomultiplicador consiste de um cátodo, eletrodos (dinodos) e um anodo. A luz proveniente do cintilador incide sobre o cátodo produzindo efeito fotoelétrico. Os elétrons são acelerados em direção ao primeiro dinodo, onde produzem elétrons secundários em maior número, os quais são acelerados até o segundo dinodo e assim por diante até que se chegue ao anodo um grande número de elétrons, proporcional ao número de fotos-elétron inicial. A altura do pulso é proporcional à energia da radiação depositada sobre o detector.

A eficiência de cintilação para um cintilador é definida como a fração da energia de todas as partículas incidentes que são transformadas em luz visível.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

II-1 Arranjo Experimental

Neste trabalho foram desenvolvidos 2 (dois) experimentos com o objetivo de calibrar uma sonda nuclear, para a determinação do teor de umidade do solo.

Estes arranjos tiveram como componentes os seguintes elementos:

- Fonte Amerício-241;
- Detectores de Cintilação;
- Guia Líquido de Luz;
- Acoplamento ao tubo fotomultiplicador;
- Microcomputador com placa de aquisição FMS CANBERRA;
- Cilindros com amostras de solo.

Cada um destes componentes será descrito em detalhes a seguir.

II-2 A fonte de Amerício-241

Para a determinação da umidade de solo foram utilizadas duas fontes de Amerício-241 de atividades de 7400 MBq (200 mCi) e 518 MBq (14 mCi). As dimensões da fonte de 7400 MBq são de 7 mm de diâmetro externo com 5 mm de diâmetro ativo. A de 518 MBq tem 3 mm de diâmetro externo e 2 mm de diâmetro ativo. Ambas as fontes tem 10 mm de comprimento e são incorporadas a esferas cerâmicas, seladas e soldadas em cápsulas de aço inoxidável. A **Figura 5** mostra esquematicamente detalhes da geometria da construção e as dimensões da fonte de 7400 MBq.

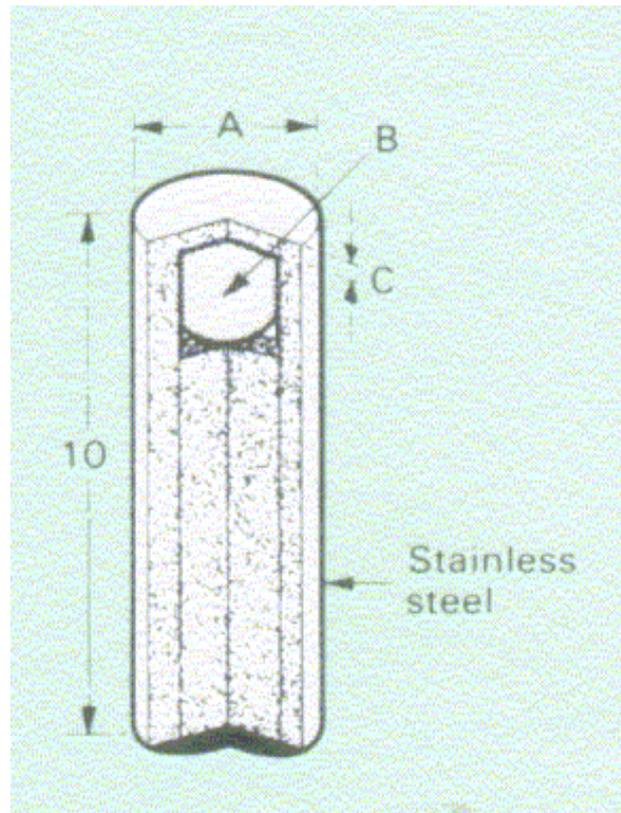


Figura 5. Detalhes de construção e dimensões da fonte de Amerício-241. (Catálogo Amersham)

O Amerício-241 é uma fonte de raios gama de baixa energia. Nos experimentos procurou-se usar esta fonte, em função da segurança em seu manuseio. Verificou-se também, se os fótons secundários resultantes do espalhamento Compton poderiam ser detectados e medidos, estabelecendo-se uma relação que permitisse obter a umidade do solo e a densidade de fótons espalhados. Esta fonte foi alinhada no eixo de simetria do detector, sendo construído em laboratório um suporte de espuma, fixando-a na vertical no início da sonda.

A vantagem de se trabalhar com a fonte de Amerício-241 é a menor exposição do operador à radiação, tendo em vista que esta é facilmente blindada com apenas 0,5cm de espessura de chumbo, enquanto que a utilização de Césio-137, 663 Kev, implica no uso de blindagem com no mínimo 7 cm de espessura de chumbo.

II-3 O cintilador plástico do experimento

O cintilador utilizado no trabalho é produzido pela REXON e equivale ao BC-400 da BICRON. A composição deste cintilador é praticamente PoliVinilTolueno, cuja densidade é de 1,032 g.cm⁻³ com índice de refração de 1,58. A temperatura na qual o cintilador começa a perder as suas propriedades estruturais e fundir é de 70 °C.

A grande vantagem do uso de cintiladores plásticos é a sua flexibilidade. São de fácil manipulação para permitir ser usinados de forma conveniente para cada aplicação. Eles têm uma boa eficiência de detecção e um custo relativamente baixo. Após usinagem procedeu-se o polimento (Silva, 2004), onde por via úmida obteve-se uma peça uniforme, brilhante e transparente à passagem dos fótons. As características do cintilador são de fundamental importância tanto para a qualidade do espectro formado quanto para o tempo de análise da amostra.

Apesar de suas diferenças estruturais, cintiladores inorgânicos e orgânicos diferem basicamente quanto à faixa de energia dos fótons a que são mais sensíveis. Para uma energia típica dos raios gama na escala de 10 KeV até 1 MeV, os mecanismos principais da interação envolvidos são o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton.

Cintiladores inorgânicos geralmente são feitos de elementos de *Z* elevado e têm uma densidade elevada. O número atômico elevado realça a contribuição fotoelétrica da interação e a alta densidade aumenta sua eficiência. A contribuição fotoelétrica permite medir o pico de atenuação total. O NaI(Tl), por causa de seus componentes com elevado número atômico e de sua saída de muitos fótons de luz, pode ser usado para detecção dos raios X tão baixos quanto os de Fe-55 (5,9 KeV).

Em contraste, cintiladores orgânicos são feitos de elementos de baixo *Z* e têm uma densidade baixa. Conseqüentemente, o mecanismo principal da interação é o espalhamento Compton. O efeito fotoelétrico é dominante somente em baixa energia (tipicamente abaixo de 20 KeV). Por causa da densidade baixa, mais volume é requerido para obter uma eficiência razoável da detecção. Entretanto, o custo relativamente baixo dos cintiladores plásticos compensa até mesmo quando detectores grandes são requeridos.

A baixa eficiência dos cintiladores orgânicos (leitura da luz produzida) resulta em impulsos relativamente fracos para as energias dos raios X e gama abaixo de

100 KeV. Cintiladores plásticos padrões (**Figura 6**), tal como BICRON BC – 400, produzem um número de fótons de luz 4 vezes menor do que o NaI(Tl). Conseqüentemente, o uso principal de cintiladores plásticos para detecção é para raios gamas com energia acima de 100 KeV. O limite da energia pode ser reduzido usando um tubo fotomultiplicador de baixo ruído, o dispositivo comum da leitura de saída da maioria dos cintiladores. Cintiladores plásticos também são muito usados como detectores de nêutrons.



Figura 6. Esquerda: cintilador orgânico inteiro e um cortado ao meio, para ser usinado e polido antes de sua utilização; direita: cintiladores orgânicos utilizados no experimento (Silva, 2004).

Cintiladores plásticos não são muito apropriados para detecção de raios X e de raios gama de baixa energia e não devem ser usados para espectroscopia dos raios X e gama, porém são úteis para detectar fótons, ainda que de energias baixas, onde o mais importante é realizar contagens integrais por causa de sua facilidade de usinagem. Os cintiladores plásticos são também usados em detectores de raios gama para processos industriais (densitometria, nível de calibração).

II-4 Guia Líquido de luz

O Guia Líquido de luz usado nos experimentos é composto por um tubo, como uma mangueira, constituído de três camadas e está representado na **Figura 7**:

- 1ª camada: tem como função a vedação à luz externa;

- 2ª camada: é intermediária, feita de metal, e tem a função de proteger o guia de luz que se encontra em seu interior;

- 3ª camada: tubagem interna, é um polímero constituído de um material específico e cheio de um líquido cristalino, homogêneo e transparente o bastante para guiar um feixe de luz (visível, infravermelho ou próximo ao índice de refração) através de um trajeto qualquer.



Figura 7. Esquerda - detalhe da ponta de um guia líquido; direita - um guia líquido de 3 metros de comprimento (Silva, 2004).

O material da canalização interna deve ter um índice refração baixo e, de forma ideal, menor do que o da água. Até recentemente os líquidos de preenchimentos utilizados eram solventes orgânicos que possuem índice de refração muito alto. Dentre os mais comuns situa-se: dissulfeto de carbono ou misturas de solventes aquosos que contenham grande quantidade de álcool ou glicol.

O centro do guia líquido de luz é chamado de núcleo e a região externa é chamada de casca. Para que ocorra o fenômeno da reflexão interna total é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o índice de refração da casca. A parte interna do tubo está cheia de um fluido que é transparente e não tóxico.

O tubo é vedado nas duas extremidades e possui em cada uma delas uma janela de vidro ou de sílica. Estas extremidades não devem possuir rugosidade, portanto devem ser bastante polidas.

Estas janelas são protegidas, em geral, por bainhas de aço inox, cujo formato facilite a sua interconexão nas extremidades de quaisquer posicionadores para os guias. O guia de luz é robusto e tem longa vida útil quando é utilizado de modo correto.

Um dos diferenciais de um guia líquido de luz é que ele provê os requerimentos de flexibilidade e durabilidade em aplicações manuais ou automatizadas. Ele permite uma excelente transmissão de luz ultravioleta e luz visível numa faixa de 250,0 a 750,0 nm.

Um cabo acoplado a um cintilador pode ter comprimento de até 30 m sem que haja perdas significativas de luz de uma ponta a outra (Altkorn *et al.*, 1997; Waterbuy *et al.*, 1997). Sua flexibilidade é ótima e não existe perdas quando se efetua curvas de pequeno raio. Além disto, permite um fluxo de 30% a mais de luz ultravioleta se comparado às fibras óticas de vidro e menos propenso à quebra. Está disponível com núcleos de 3,0 mm, 5,0 mm, e 8,0 mm de diâmetro e numa larga faixa de comprimentos. Ademais, a abertura numérica é da ordem de 0,59, ao passo que, para uma fibra ótica de vidro, a abertura numérica é de 0,22 a 0,25 (Altkorn *et al.*, 1999).

Para revestimento externo o guia de luz pode ser protegido por uma variedade de materiais, incluindo alumínio, borracha, PVC, e aço galvanizado. Recentemente muitas pesquisas com guias líquidos de luz estão sendo desenvolvidas com o uso de flúor polímero. O principal deles já está disponível no mercado com o nome de Teflon AF.

Este flúor polímero é transparente para uma faixa de comprimento de onda que vai de 20 a 2000 nm. Seu índice de refração é de 1,29, menor que da água, que é (1,33). Assim, quando um tubo ou mangueira com estas propriedades é cheio de água ele se comporta como um guia para a luz, transferindo-a de forma eficiente de uma ponta a outra.

Para maximizar a transferência de luz de um ponto a outro, um guia líquido de luz oferece vantagens significantes se comparado ao feixe de fibra ótica, dentre as quais cita-se:

1. Tem um custo menor que os feixes fibras óticas de tamanho equivalente;
2. Possui transmitância mais alta no comprimento ultravioleta (UV), até 300 nm;
3. Possui transmitância mais alta no comprimento próximo ao infravermelho (NIR);
4. Ângulos de aceitação maiores;
5. Produção de luz mais uniforme;
6. Alto processamento através do aumento do ângulo de aceitação, cerca de 72°, comparado aos 25° em feixes de fibras óticas.

7. Um guia líquido de luz resiste melhor à limpeza e às dobras.

Os guias líquidos de luz usados no presente trabalho foram desenvolvidos utilizando-se da resina fabricada pela Du Pont que são denominados de Teflon AF. Estas mangueiras são preenchidas com etileno glicol, e têm como característica principal a baixa perda de fótons devido a sua excelente transparência e ao baixo índice de refração.

Essas características permitem à transmissão dos fótons do cintilador para o foto-catodo com perdas, praticamente desprezíveis, através da reflexão total. O índice de refração do teflon AF é de 1,29 e do etileno glicol 1,43.

II-5 Acoplamento do Guia Líquido à Fotomultiplicadora

A fotomultiplicadora teve sua superfície recoberta por uma película de aproximadamente 2 mm de teflon deixando um orifício de 8 mm de diâmetro, suficiente para um encaixe entre o guia líquido e a fotomultiplicadora. A função da camada de teflon é servir de superfície refletora para os fótons residuais que se encontram na região do foto-catodo do Tubo Fotomultiplicador (PMT).

Para o contato entre o guia líquido e a válvula fotomultiplicadora, foi utilizado um gel de contato. Foi desenvolvida também, uma peça em alumínio, para acomodação e estabilização do guia junto à fotomultiplicadora (PTM), contendo em seu interior uma peça isolante de silicone preto.

Todo o conjunto foi revestido por um tubo termorretrátil preto, com a finalidade de vedar a passagem de luz. Esta peça confere estabilidade através da pressão exercida sobre o guia líquido de forma homogênea, impedindo seu deslocamento. A foto do conjunto está na **Figura 8**.

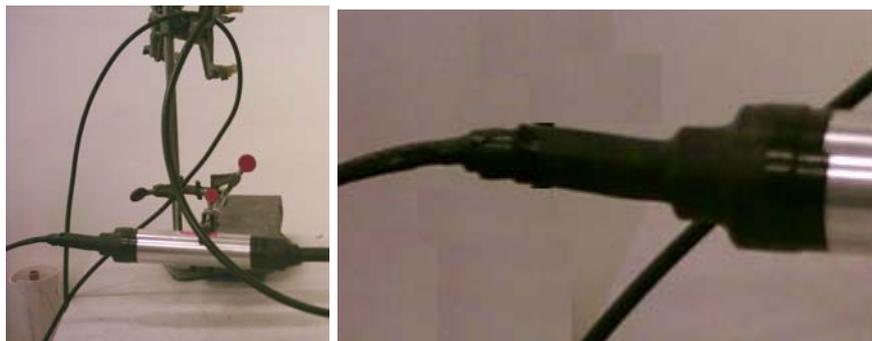


Figura 8. Acoplamento entre a fotomultiplicadora e o guia líquido de luz.

Para a coleta dos dados foram utilizadas duas placas distintas:

1^a - Uma placa do tipo NaI-Plus para formação de espectros. Com esta placa foi possível realizar os ensaios preliminares e analisar a distorção nos pulsos oriundos do espalhamento da fonte no meio.

2^a - Uma placa do tipo FMS Multi-Scale para contagens em série dos experimentos. Esta placa não consegue gerar espectros, contudo gera um grande volume de dados em um tempo pré-determinado para análise estatística satisfatória.

II-6 Amostras de solos

Para o desenvolvimento dos experimentos, foram preparadas amostras de solos em recipientes apropriados para determinação da umidade. Os solos selecionados, (**Figura 9**) segundo a terminologia adotada pelo DER-MG, foram do tipo:

- Silte (classificação B.P.R. grupo A-4).
 - Saibro (classificação B.P.R. grupo A-1).
- } **Experimentos 1 e 2**
- Arenito (classificações B.P.R. grupo A-2) (Vargas, 1977).
- } **Experimento 3**



Figura 9. Da esquerda para a direita, silte, saibro e arenito. O último recipiente contém água, para os experimentos com umidade.

Estes solos de textura fina (tamanho relativo dos grãos com diâmetro inferior a 0,1 mm) foram tratados granulometricamente utilizando-se do peneiramento simples do solo seco, através das peneiras padronizadas da série Tyler – de aberturas de malhas rigorosamente estabelecidas. Tal procedimento permitiu que as amostras fossem homogêneas para os trabalhos de determinação da umidade.

Para o experimento 2, foi utilizada uma amostra de solo do tipo arenito passada 100 % na peneira 20 (série Tyler) de abertura de malha 0,84 mm (**Figura 10**).



Figura 10. Amostras de solo utilizadas no experimento.

II-7 Experimentos.

II-7.1 EXPERIMENTO 1: Influência do volume de solos nas contagens

Para testar a influência do volume de solos nas contagens, foi realizado um experimento em que a fonte de Americio-241 de atividade 7.400 MBq (200 mCi) se encontrava no interior de uma blindagem de chumbo, revestida de alumínio, com orifício de cerca de 1 cm de diâmetro e 5 cm de profundidade. Um recipiente cilíndrico de plástico de 3 cm de diâmetro e 5 cm de altura foi colocado na direção do feixe.

Inicialmente, foi feita a medida do background com o recipiente vazio. A partir daí, o mesmo foi preenchido com solo de 2 em 2 mL e as contagens realizadas. A **Figura 11** ilustra o procedimento.



Figura 11. Experimento para medida da influência do volume de solo no espalhamento da radiação.

Para este experimento e para o seguinte, o experimento 2, os solos utilizados foram silte e saibro.

II-7.2 EXPERIMENTO 2 : Ensaio da técnica de espalhamento utilizando ângulo de 90° entre fonte e detector.

Utilizou-se um arranjo experimental como o ilustrado na **Figura 12**, contendo um castelo de chumbo (revestido de Alumínio) para armazenar a fonte de Amerício-241 de atividade de 7.400 MBq (200 mCi). Esta fonte foi colimada na posição vertical com abertura de 3 cm de diâmetro. A intenção foi irradiar toda a amostra de solo de forma homogênea, de baixo para cima.

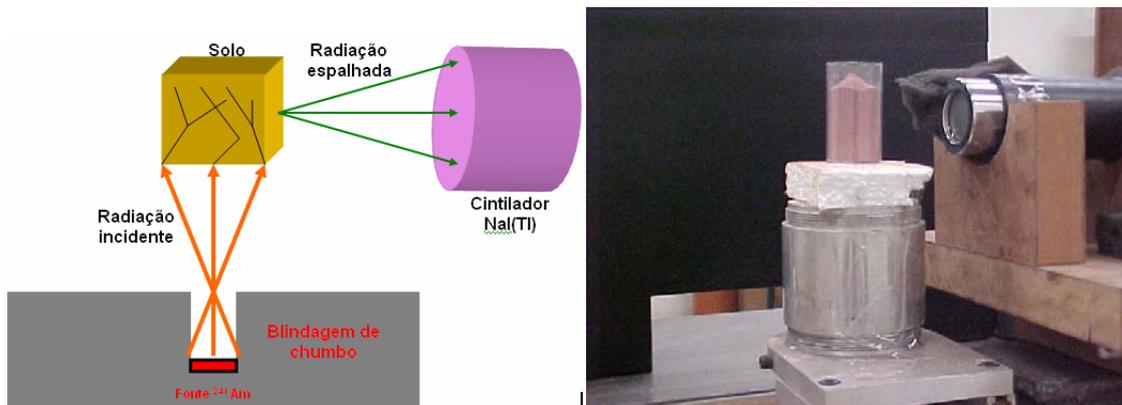


Figura 12. Montagem do experimento 1, com fonte abaixo, dentro da blindagem, e detector à direita.

A aquisição do gama espalhado que atingiu a amostra se deu no detector que faz um ângulo de 90 graus com a fonte, estando este centralizado em relação à amostra, representado na **Figura 13**.



Figura 13. Centralização do detector em relação à amostra.

Para acomodar o solo foi utilizado um recipiente cilíndrico de acrílico de dimensões de 3 cm de diâmetro por 5 cm de altura. Neste experimento foram utilizados os três tipos de solos (**Figura 9**). O objetivo deste experimento é traçar uma curva de calibração de umidade para os solos, a partir da diferença entre as contagens na amostra úmida e seca.

Para a realização das contagens, os recipientes foram preenchidos com os três tipos de solo. Feitas estas contagens, foi-se adicionando água (**Figura 14**) a cada tipo de solo, de 2 em 2 mL, e feitas as contagens para os solos úmidos. Após cada acréscimo de água, visualmente foi controlada a homogeneidade da amostra antes da realização da contagem.

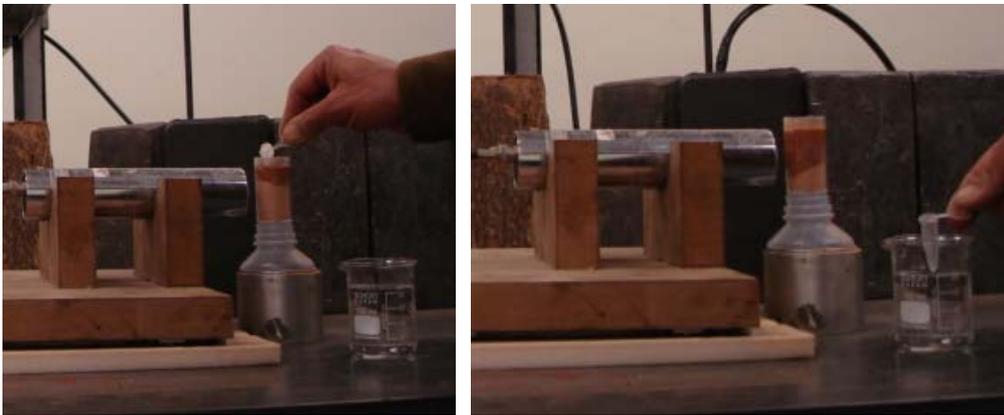


Figura 14. Acréscimo de água nas amostras de solo.

II-7.3 EXPERIMENTO 3: Medida de umidade com sonda nuclear e guia líquido

Este experimento foi para testar o funcionamento da sonda de medida de umidade, pois as amostras já tinham a umidade determinada. Com ele, foi possível se obter a curva de calibração da sonda.

Neste outro arranjo experimental, a fonte de Amerício-241 utilizada foi a de 518 MBq (14 mCi). Isto foi efetuado porque é necessário um esquema mais compacto, para introdução da sonda no solo. Inclusive uma fonte de menor intensidade permite a redução nas blindagens necessárias, sem comprometer a segurança exigida pela radioproteção.

A sonda utilizada foi construída com o guia líquido de luz. Na sua montagem, por etapas, foi colocado:

- 1- um espaçador de borracha;
- 2- a blindagem para a fonte de Amerício-241;
- 3- a blindagem de chumbo para evitar contagem da radiação direta;
- 4- o cintilador plástico;
- 5- o guia líquido.

Pode-se ver na **Figura 15** uma fotografia feita durante a montagem da sonda.

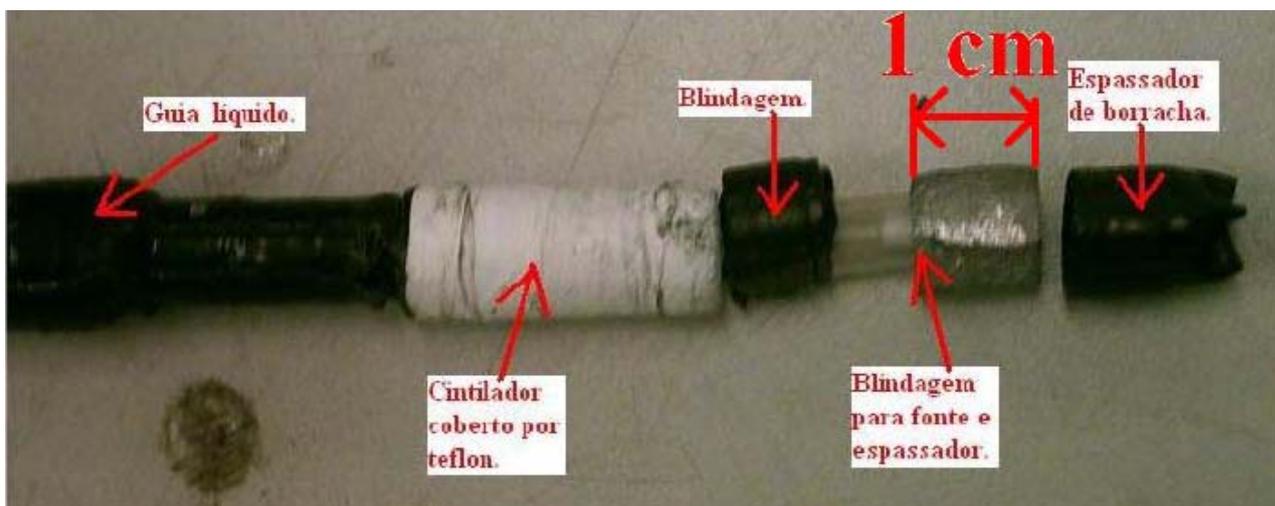


Figura 15. Montagem da sonda para introdução no solo, sem a fonte.

Nesta montagem, a fonte é introduzida numa blindagem de chumbo, impedindo que a radiação se propague fora da direção desejada no experimento. A radiação se propaga entre o espaço da primeira blindagem e a segunda, cuja finalidade é evitar justamente que a radiação direta, proveniente da fonte, atinja o cintilador. Desta maneira, a radiação que vier a atingir o cintilador será oriunda da fonte secundária. Após atingir o cintilador, os fótons de luz se propagam pelo guia líquido, até o sistema eletrônico de contagem. Toda a sonda foi revestida com plástico termorretrátil, um material que se mostrou muito útil e versátil durante as montagens.

Para a medida da densidade, a radiação que sai da fonte interage com o solo que envolve a sonda. Esta interação por Efeito Compton espalha radiação que irá atingir o cintilador plástico. Este, por sua vez, emite fótons guiados através do líquido para o

sistema de contagem: fotomultiplicador, placa de aquisição de dados, computador. Um esquema e uma foto do experimento estão ilustrados na **Figura 16**.

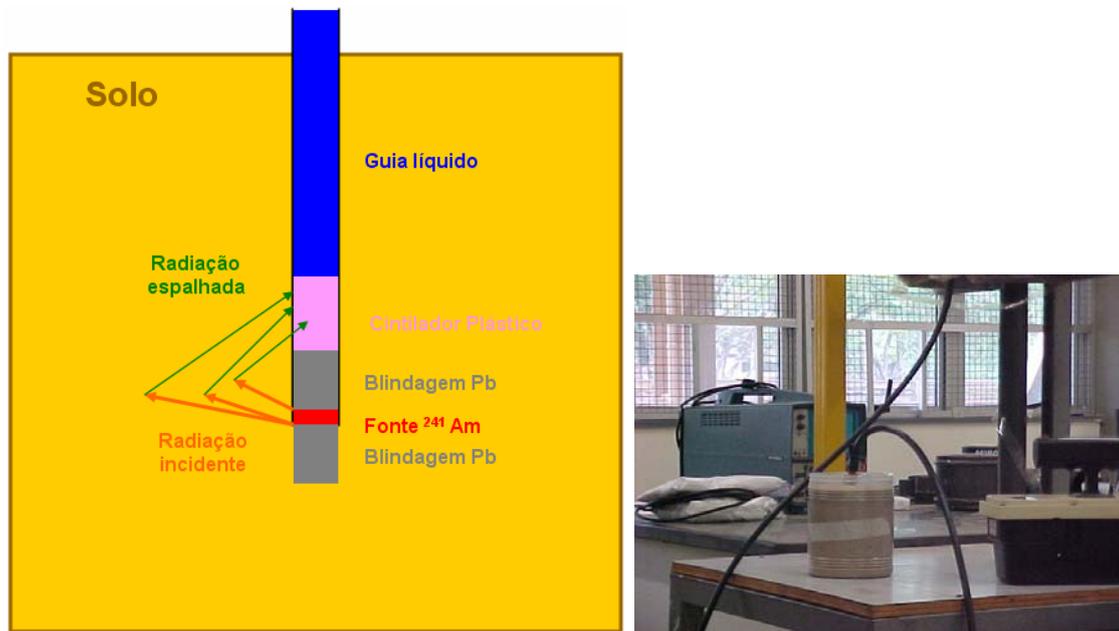


Figura 16. Esquema para medida da densidade com sonda introduzida na amostra de solo.

Uma vantagem deste sistema é que o módulo fonte-cintilador é bastante compacto. O outro aparato, a eletrônica associada, fica distante da fonte, conectado pelo guia líquido. A fonte de Amerício-241 já tem energia relativamente baixa e ainda é protegida por blindagem, melhorando a proteção do operador. A fração da radiação que sai da fonte interage com o solo e é atenuada, fazendo com que a intensidade da radiação externa ao experimento seja bem pequena.

As amostras foram colocadas em recipientes cilíndricos de plástico de 12 cm de diâmetro por 15 cm de altura, com capacidade volumétrica interna de 1500 cm³. No centro deste dispositivo foi colocado um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro externo, vedado em sua extremidade inferior, para servir como guia da sonda de medida de umidade. Neste sistema foi utilizado somente um tipo de solo, Arenito, para realização dos ensaios.

Foram preparadas 6 amostras para testar a sensibilidade da sonda à umidade. Esta foi variada de do solo seco até 25%, com variações percentuais de 5 em 5% de umidade.

As medidas de umidade foram feitas em base de volume. Sendo as amostras de 1500 cm^3 de solo cada uma, 5% de umidade corresponde a 5% de 1500 cm^3 , ou seja, 75 cm^3 de água a ser acrescentada. E assim por diante até os 25% de umidade (**Figura 17**). Para cada amostra, foi acrescentado seu respectivo volume de água, tomando-se o cuidado de não haver nenhuma compactação durante todo o processo.



Figura 17. Amostras de solo com umidade determinada.

III. RESULTADOS

III-1 Contagens obtidas para variação no volume de solo

O Primeiro experimento realizado teve o objetivo de mostrar a influência do volume de solo na intensidade da radiação espalhada na condição ilustrada na **Figura 12**. Na **Figura 18** está representada a superposição das curvas das amostras dos dois tipos de solos utilizados neste experimento. As variações das contagens são justificadas pelas diferenças entre as suas composições elementares.

Pode-se notar uma pequena curvatura devido à atenuação provocada pelo aumento do volume de solo nas amostras. A partir da altura de 4,5 cm o incremento nas contagens é inferior a 2%. Considerou-se então a altura de 4 cm como limite superior para a validade na relação linear entre a intensidade de radiação espalhada e o volume da amostra.

A dependência das contagens com a composição do solo demonstra a necessidade de se obter para cada um deles uma curva de calibração específica.

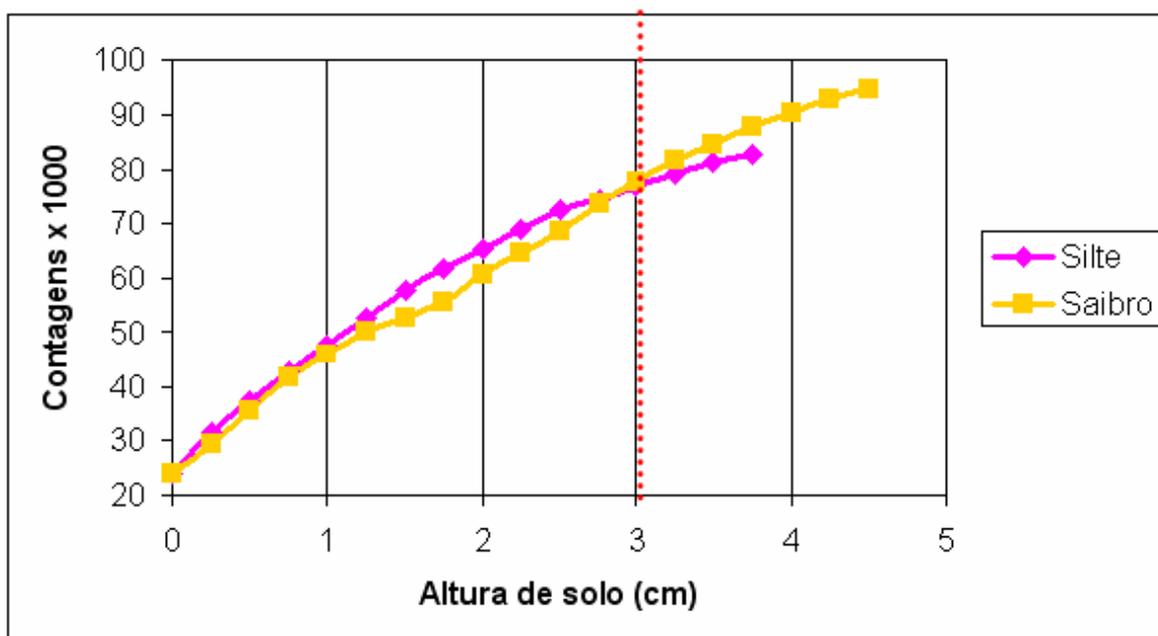


Figura 18. Gráfico das contagens *versus* altura para os dois tipos de solo.

Foi feita a regressão linear para os dados das contagens do silte e do saibro. Para o silte, o coeficiente de correlação foi de 0,97 e para o saibro 0,99. Isto mostra uma boa linearidade entre o aumento da coluna de solo no interior do recipiente e o aumento nas contagens. As **Figuras 19 e 20** mostram as regressões para o silte e o saibro.

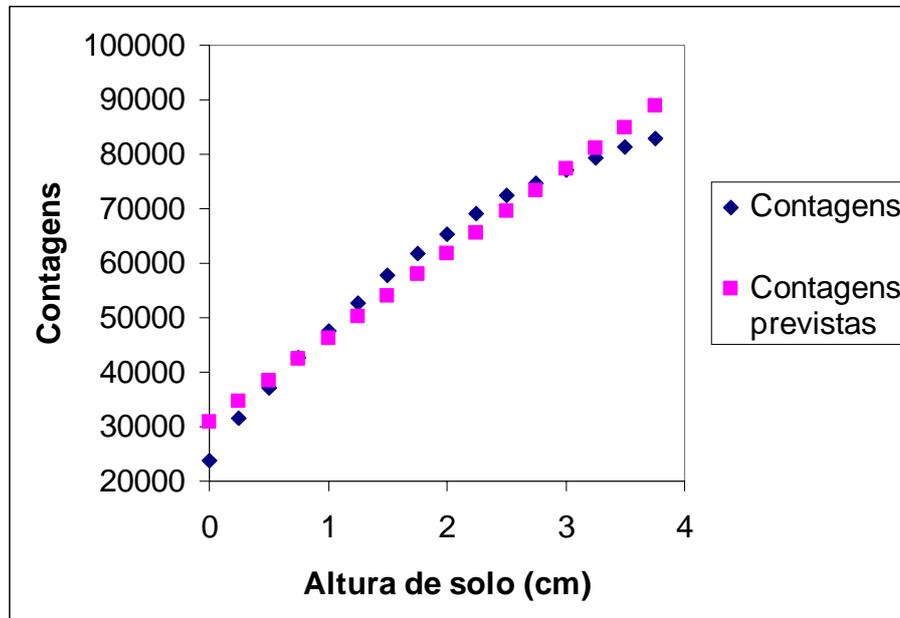


Figura 19. Regressão para os dados das contagens do silte.

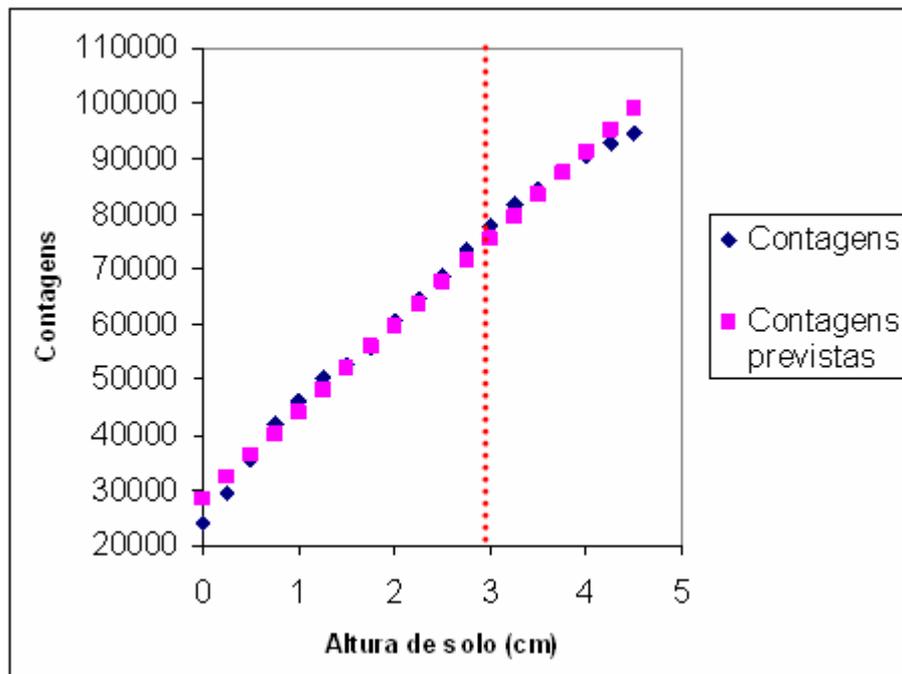


Figura 20. Regressão para os dados das contagens do saibro.

III-2 Contagens obtidas para variação na umidade do solo na técnica de espalhamento com detector a 90°

Na **Figura 21** é mostrado o comportamento proveniente da adição de volumes de água conhecidos às amostras de solos, simulando padrões de umidade até a saturação.

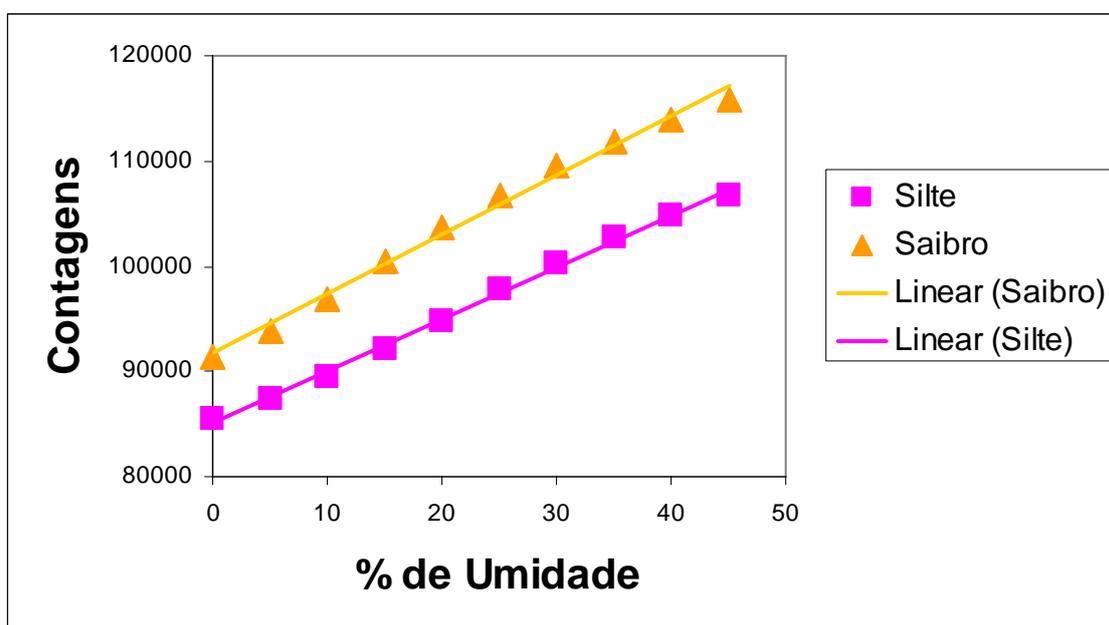


Figura 21. Gráfico das contagens *versus* umidade no silte e no saibro.

Observando a **Figura 21**, vê-se os aumentos nas contagens à medida que aumenta o percentual de umidade. Os dados podem ser normalizados utilizando-se como parâmetro as contagens obtidas no solo seco. Esta normalização leva ao gráfico da **Figura 22**.

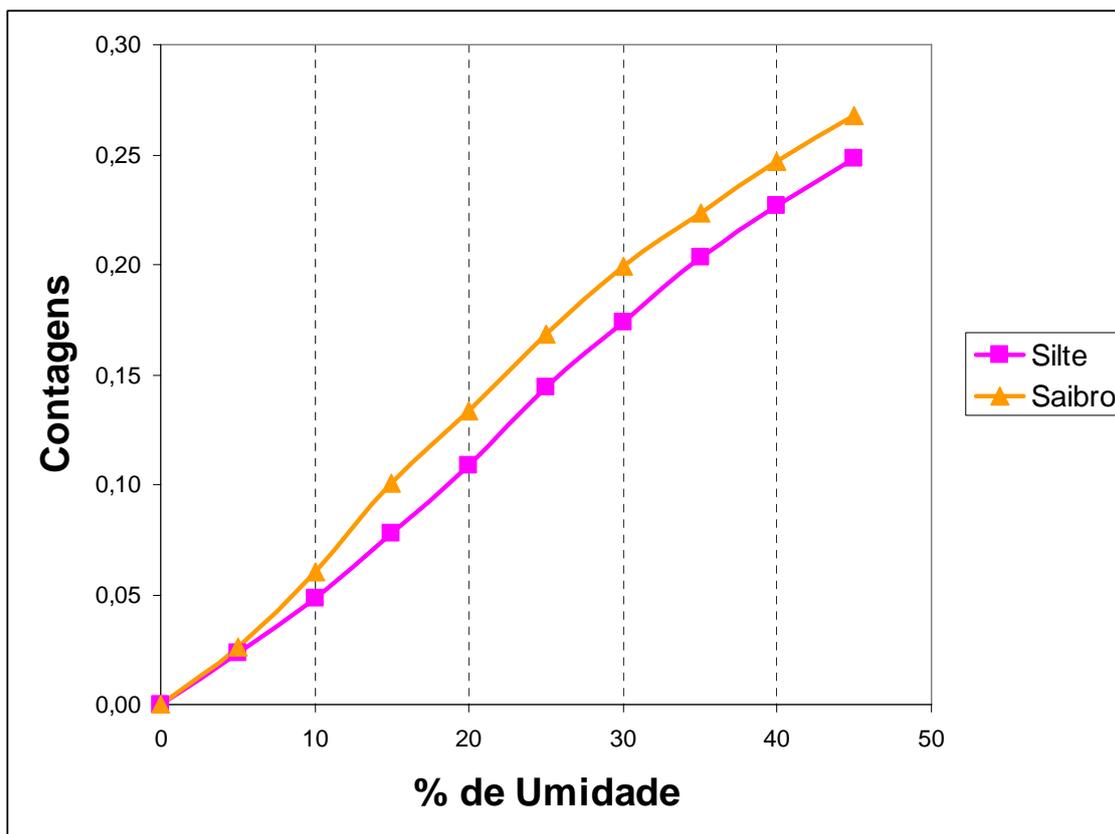


Figura 22. Contagens normalizadas para o solo seco.

Feita a regressão das contagens normalizadas, os coeficientes de correlação apresentaram uma boa linearidade na relação contagens *versus* umidade. Para os dois solos este coeficiente de correlação foi de 0,99. Assim, é possível se obter uma curva de calibração para a umidade de cada tipo de solo.

Esta curva, no caso do silte, é a descrita pela equação abaixo:

$$U = (172,8 \pm 3,3). C + (0,8 \pm 0,5)$$

onde U é a umidade percentual e C é o número de contagens obtidas.

De forma semelhante, no caso do saibro, a curva de calibração obtida é:

$$U = (160 \pm 52). C + (-0,4 \pm 0,8)$$

Obviamente, para um sistema em plena operação, estas equações se programados no computador forneceriam *on line* os valores de umidade para uma amostra qualquer dos solos calibrados.

III-3 Medida de umidade com sonda nuclear e guia líquido

A sonda construída, propósito deste trabalho, ilustrada na **Figura 16**, apresentou o resultado ilustrado na **Figura 23**. Cada ponto neste gráfico representa a média de no mínimo 20 contagens de 20 segundos cada, sendo calculados os respectivos Desvios Padrão. No gráfico ilustrado abaixo a barra de erro vertical (eixo Y) não aparece, pois o maior desvio padrão encontrado foi inferior a 0,18% sendo imperceptível.

Foram representadas somente as contagens devido ao espalhamento gama na água, mostrando apenas o incremento dessas contagens devido à umidade no solo. Esta curva foi obtida subtraindo-se os valores das contagens do solo úmido em relação ao solo seco, como no experimento 2.

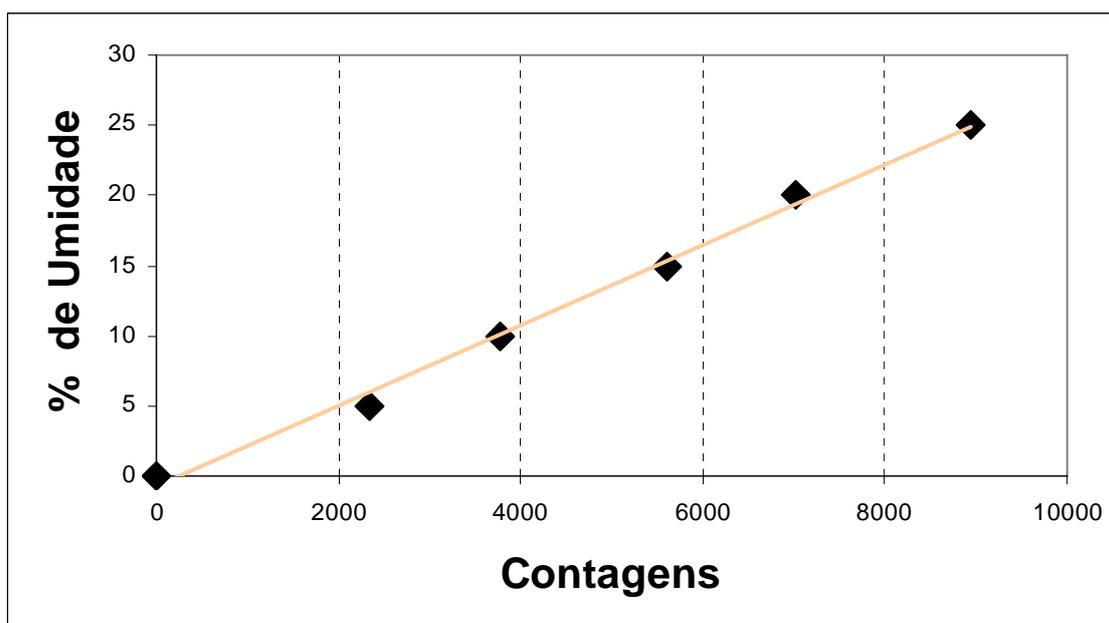


Figura 23. Gráfico das contagens versus umidade obtidas com a sonda nuclear.

Foi feita a regressão para a obtenção da curva de calibração. O coeficiente de correlação neste caso também mostrou uma linearidade: 0,99.

A partir da regressão, foi obtida também a curva de calibração da sonda. A equação da curva de calibração para a sonda está mostrada abaixo.

$$U = (287,3 \pm 9,7) \cdot 10^{-5} C + (0,8 \pm 0,5)$$

IV. CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos realizados, podemos listar as seguintes conclusões:

- O espalhamento Compton da radiação gama de 60 keV pode ser a base de uma nova técnica de medida de umidade de solo.
- As variações das contagens espalhadas foram linearmente correlacionadas com as variações de umidade de uma mesma amostra de solo.
- A curva de calibração umidade *versus* contagens é dependente da composição do solo. Assim, deve ser obtida uma curva de calibração para cada solo.
- O arranjo com a fonte, detector e cintilador plástico acoplado a um guia líquido de luz permite fazer medidas de perfis de umidade.

V. PERSPECTIVAS

- Comprovada a viabilidade técnica de se utilizar o espalhamento Compton para medir umidade de um solo, pode-se utilizar o código Monte Carlo para otimizar os parâmetros geométricos do sistema.
- Protótipos para serem utilizados em campo e em laboratório poderão ser construídos para medir umidade de pequenas amostras de solo bem como perfis de umidade em condições de campo.
- Outra fonte de radiação gama tal como o Rádio-226 poderá ser utilizada. Isto pode aumentar o volume de solo onde ocorre o espalhamento Compton e, conseqüentemente, estudar as variações de umidade em solos mais compactados.

VI. LITERATURA CONSULTADA

Altkorn, R., I. Koev, R.P. Van Duyne, M. Litorja. Low-loss liquid-core optical fiber for low-refractive-index liquids: fabrication, characterization, and application in Raman spectroscopy. Applied Optics, v.36, n.35, 1 December, p.8992-8998. 1997.

_____. Raman Performance Characteristics of Teflon AF 2400 Liquid-Core Optical-Fiber Sample Cells. Applied Spectroscopy, v.53, n.10, p.1169-1176. 1999.

Ayers, P. D. e H. D. Bowen. Laboratory investigation of nuclear density gauge operation. ASAE Paper No 85 - N1541 p. 1985.

Belcher, D. J., T. R. Cuykendll. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma ray scattering. CAA Techn, v.127, October 1950. 1950.

Borges, E. N., F. L. Neto, Corrêa, G. F., Borges, E. V. S. ALTERAÇÕES FÍSICAS INTRODUZIDAS POR DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO TEXTURA MÉDIA. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.34, n.9, p.1663-1667. 1999.

Bushberg, J. T., J. A. Seibert, E. M. Leidholdt, Jr, J. M. Boone. The Essential Physics of Medical Imaging. Philadelphia, PA - USA: Lippincott Williams & Wilkins. 2002

Cotecchia, V., A. Inzaghi, Pirastru, E. Influence of the physical and chemical properties of soil on measurements: of water content using neutron probes. Water Resources Res, v.4., n.5, p. 1025-1028. 1968.

Dress, P. e H. Franke. Increasing the accuracy of liquid analysis and pH-value control using a liquid-core waveguide. Rev. Sci. Instrum, v.68, p.2167-2171. 1997.

Gameda, S., G. S. V. Raghavan. Single and dual probes for soil density measurement. Transactions of the ASAE, v.30, n.4, p.932-934. 1987.

Gardner, W. Water content and Methods of Soil Analysis. Wisconsin (USA): American Society of Agronomy of Soil Science Society of America, Inc. 493-544. p. 1986.

Gardner, W. e D. Kirkham. Determination of soil moisture by neutron scattering: Soil Sci., v.7. 1952. 391-401 p.

Gigante, G. E. e S. Sciuti. A large-angle coherent/Compton scattering method for measurement in vitro of trabecular bone mineral concentration. Med Phys, v.12, n.3, p.321-326. 1985.

Gurr, C. C. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil. Soil Sci., p.224-229. 1959.

Holmes, J. W. Calibration and field of use of the neutron scattering method of measuring soil water content. : Aust. J. Appl. Sci., v.2. 45-58 p. 1955.

_____. Neutron scattering technique for measuring water content of soil and other materials. . p.607. 1958.

Jansson, K.-J. Comparison of Density and Water Content Determinations Using Soil Cores and a Dual Probe Density Gauge. International Journal of Forest Engineering, v.10, July, 1999, p.2. 1999.

Kinght, A. B. e T. W. Wright. Soil moisture determinations by neutron scattering. Oxford, Radio-Isotope Conf., v.2. 111-122 p. 1954.

Knoll, G. F. Radiation detection and measurement: John Wiley & Sons. 1989

Randrup, T. B. e J. M. Lichter. Measuring soil compactation on construction sites: a review of surface nuclear gauges and penetrometers. Journal of arboriculture, v.27, n.3, may 2001, p.109-117. 2001.

Silva, M. R. D. S. Desenvolvimento de um Densímetro Nuclear por Difusão Compton utilizando um Guia Líquido de Luz. PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE, 2004.

Singh, B. P. e B. Kumar. Gamma-ray transmission method for the study of soil-water characteristics. Indian Journal of Pure & Applied Physics, v.26, n.5, p.376-379. 1988.

Stalp, J. T. e R. B. Mazess. Determination of bone density by coherent-Compton scattering. Med Phys, v.7, n.6, p.723-726. 1980.

Stewart, G. L. e S. A. Taylor. Field experience with the neutron scattering method of measuring soil moisture., Soil Sci., v.83. 151-158 p. 1957.

Tartari, A., C. Baraldi, J. Felsteiner, E. Casnati. Compton scattering profile for in vivo XRF techniques. Phys Med. Biol., v.36, n.5, p.567-578. 1991.

Tauhata, L., I. P. A. Salati, R. D. Prinzio, A. D. Prinzio. Radioproteção e Dosimetria: fundamentos: IRD - CNEN. 2003.

Teixeira, S. A. Medida da Umidade de Solos usando um cristal de LiI(Eu) Acoplado a um Guia Líquido de Luz. PCTN, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

Topp, C. G., J. L. Davis, *et al.* Electromagnetic determination of soil water content using TDR: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., v.16, p.574-582. 1980.

Vargas, M. Introdução à Mecânica dos Solos: MCgraw-Hill do Brasil - Ed. Universidade de São Paulo. 1977

Waksman, S. A., W. Humus. Neutron soil moisture gauges. Atomic Energy Review, v.4. p. 143-167. 1938.

Waterbuy, R. D., W. Yao, R. H. Byrne. Long Pathlength absorbance spectroscopy: trace analysis of Fr(II) using a 4.5m liquid core waveguide. Analytica chimica acta, v.357, p.99-102. 1997.

Winistorfer, P. M. e W. W. M. Jr. Dynamics of Wood Composite Mats During Consolidation: Monitoring Density Development During Pressing with an In-situ Density Monitoring System. Proceedings of the Second European Panel Products Symposium. October, 12-23 p. 1998.

Zazueta, F. S. e J. Xin. Soil Moisture Sensors. Florida Cooperative Extension Service, v.292. 1994.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)