

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

Otimização de Parâmetros Geométricos de uma Sonda Nuclear
Para Medida da Umidade de Solos por Espalhamento Compton
Usando o Código MCNP

Aluna: Fabiana Beghini Avelar
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

**Otimização de Parâmetros Geométricos de uma Sonda Nuclear
Para Medida da Umidade de Solos por Espalhamento Compton
Usando o Código MCNP**

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 para obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

ÁREA: Aplicações das Radiações,
Radioproteção e Instrumentação Nuclear.

FABIANA BEGHINI AVELAR

Belo Horizonte – MG

Fevereiro - 2008

*“Tristes tempos os nossos:
mais fácil desintegrar um átomo
do que o preconceito”.*
Albert Einstein

*Dedico este trabalho ao meu marido Igor
e aos meus pais Fábio e Rosângela.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Fábio e Rosângela, pela oportunidade de estudar e pelo contínuo apoio.

Ao meu marido Igor, pelo tempo abdicado durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Clemente Carneiro, por ter me recebido, me apoiado e me orientado com tanta dedicação durante a execução deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Nuclear, por ter me acolhido pela segunda vez.

A nova grande e eterna amiga Márcia Flávia, pela imprescindível orientação, pela agradável companhia, pelo ombro nas horas precisas e pela grande amizade.

Ao colega, amigo e “irmão radioativo” Mário Roberto, pela “irretribuível” ajuda durante todo o trabalho.

Aos grandes amigos do departamento, pelos momentos vividos, pela amizade e apoio e companhia no cafezinho.

Ao professor Arno, pelos agradáveis momentos passados nas festas em sua casa.

A professora Claúbia, pelas sugestões, pelos esclarecimentos e pela grande ajuda.

Ao Professor Celso Baeta por ter me disponibilizado as amostras de solo na Estação Ecológica.

A professora Cristiane pelas importantes orientações.

E por todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUÇÃO	XIII
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
1.1 Características gerais dos solos	14
<i>1.1.1 Constituição</i>	14
<i>1.1.2 Densidade</i>	14
<i>1.1.3 Porosidade</i>	15
<i>1.1.4 Umidade</i>	17
1.2 Principais métodos de medida da umidade dos solos	18
1.3 Medida da umidade por meio de espalhamento Compton	19
1.4 Interação da radiação gama com a matéria	20
<i>1.4.1 Efeito fotoelétrico</i>	21
<i>1.4.2 Efeito Compton</i>	22
<i>1.4.3 Produção de pares</i>	23
<i>1.4.4 Atenuação da radiação gama</i>	24
1.5 Os detectores de cintilação e o guia de luz	24
1.6 Código computacional MCNP	25
2 MATERIAIS E MÉTODOS	27
2.1 Simulações do experimento	27
<i>2.1.1 Elaboração e otimização da geometria do sistema</i>	27
<i>2.1.2 Amostra de solo</i>	29
<i>2.1.3 Fonte utilizada</i>	29
<i>2.1.4 Dados de entrada</i>	31
<i>2.1.5 Estudo da sensibilidade dos principais elementos presentes no solo</i>	31
2.2 Arranjo experimental	32
<i>2.2.1 Montagem do experimento</i>	32
<i>2.2.2 Preparação da amostra experimental de solo</i>	34
<i>2.2.3 Detector de Cintilação</i>	34
<i>2.2.4 Guia líquido de luz</i>	35
<i>2.2.5 Acoplamento do guia líquido de luz à fotomultiplicadora</i>	36
<i>2.2.6 Placa de aquisição de dados</i>	36
<i>2.2.7 Medida da umidade das amostras experimentais de solo</i>	37
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 Otimização da geometria	38
<i>3.1.1 Dados de entrada referentes à amostra de solo</i>	38
<i>3.1.2 Espessura da blindagem</i>	39
<i>3.1.3 Distância entre a fonte e o detector</i>	40
<i>3.1.4 Dimensões da amostra de solo</i>	41
<i>3.1.5 Geometria do sistema</i>	43

3.2 Influência dos principais elementos presentes no solo	44
3.3 Curva de calibração	45
3.3.1 <i>Análise teórica</i>	45
3.3.2 <i>Análise experimental</i>	46
4 CONCLUSÕES	49
5 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	49
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração dos tipos de poros de um solo	15
Figura 2: Ilustração comparativa entre um solo saturado e um não saturado	16
Figura 3: Predominância dos mecanismos de interação da radiação com a matéria.....	20
Figura 4: Representação do efeito fotoelétrico.....	22
Figura 5: Representação do Efeito Compton.....	22
Figura 6: Representação do efeito de formação de pares	23
Figura 7: Esquema ilustrativo da geometria dos sistemas simulados	28
Figura 8: Esquema de decaimento da fonte de Amerício-241	30
Figura 9: Foto da montagem do experimento	33
Figura 10: Foto da amostra de solo utilizada no experimento	34
Figura 11: Foto do cintilador utilizado no experimento	35
Figura 12: Foto do guia líquido de luz utilizado no experimento	35
Figura 13: Foto do acoplamento do guia líquido de luz à fotomultiplicadora	36
Figura 14: Relação entre o fluxo de gamas e a espessura da blindagem	40
Figura 15: Relação entre o fluxo de gamas e a distância fonte-detector	41
Figura 16: Relação entre o fluxo de gamas e o diâmetro da amostra de solo	42
Figura 17: Relação entre o fluxo de gamas e a altura da amostra de solo	43
Figura 18: Relação entre o fluxo de gamas e a variação dos elementos	44
Figura 19: Relação teórica entre umidade e fluxo de fótons, para areia e solo.....	45
Figura 20: Relação experimental entre umidade e fluxo de fótons, para areia e solo.....	46
Figura 21: Curva da regressão linear, utilizando solo.....	47
Figura 22: Curva da regressão linear, utilizando areia.....	47
Figura 23: Curva de calibração, utilizando solo.....	48
Figura 24: Curva de calibração, utilizando areia.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação das dimensões dos elementos do sistema simulado	28
Tabela 2: Características da fonte radioativa utilizada nas simulações.....	30
Tabela 3: Dados de entrada para a amostra computacional de solo	31
Tabela 4: Variação das frações dos principais elementos presentes no solo.....	32
Tabela 5: Características química, física e mineralógica do solo estudado	38
Tabela 6: Composição percentual as argilas do solo.....	39
Tabela 7: Parâmetros da geometria otimizada.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

kg.m^{-3}	quilograma por metro cúbico
α	fração do volume do solo ocupado pelos poros
ρ	densidade dos solos
ρ_s	densidade de sólido do solo
E_c	energia cinética
h	constante de Planck
ν	frequência da radiação eletromagnética
B_e	energia de ligação do elétron orbital
E'	energia da radiação espalhada
E	energia da radiação incidente
E_0	energia de repouso do elétron
Z	número atômico
I	intensidade do feixe emergente
I_0	intensidade do feixe incidente
x	espessura do material
μ	coeficiente de atenuação linear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
m_s	massa de solo
V	volume da amostra de solo
μm	micrômetro
α_a	porosidade de aeração
V_{ar}	volume de solo ocupado pelo ar
U	umidade a base de massa
θ	umidade a base de volume
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
keV	quiloeltronvolt
MeV	megaeltronvolt
TDR	Time Domain Reflectometry (reflectometria no domínio do tempo)
Nm	nanômetro
PVC	PoliCloroeto de Vinila
MCNP 4C	Monte Carlo N-Particle version 4C
ENDF	Evaluated Nuclear Data File
ENDL	Evaluated Nuclear Data Library
ACTL	Activation Library
PDF	Probability distribution function
IMA	Instituto Mineiro de Agropecuária
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MBq	megabequerel
mCi	milicurie

RESUMO

Otimização de Parâmetros Geométricos de uma Sonda Nuclear Para Medida da Umidade de Solos por Espalhamento Compton Usando o Código MCNP

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo teórico-experimental da calibração de uma sonda nuclear para medida de umidade de solo. Para tanto, foi realizado um experimento para medir a umidade de uma amostra de solo com a utilização da sonda nuclear, utilizando-se amostras cilíndricas de dois tipos diferentes de solo com raio de 3,0 cm e altura de 10,5 cm. A sonda constitui-se de um cilindro de alumínio de comprimento de 5,0 cm, dentro do qual foram posicionados, axialmente, uma fonte de Amerício-241, uma blindagem de chumbo e um cintilador plástico. Este detector foi acoplado a um guia de luz e este ao fotocátodo de um tubo fotomultiplicador. Quando um feixe de radiação gama de 60 keV proveniente da fonte atinge a amostra de solo, a radiação é espalhada por Efeito Compton e medida com um detector cintilador de NaI(Tl). Foram realizadas varias simulações através do código MCNP 4C, que permitiram a montagem do sistema levando-se em consideração a geometria mais eficiente para sonda, a blindagem adequada de detecção e o estudo da resposta do detector em função da variação da umidade da amostra de solo. Após a otimização, foi acrescentado a cada amostra de solo volumes de água correspondentes as umidades que variaram entre 0 e 25% . Para cada amostra, foram realizadas 10 medidas, de 300 segundos cada. Correlações lineares entre contagens e umidade mostraram valores de coeficientes de correlação de 0,98 para o latossolo vermelho e 0,99 para a areia. Os resultados mostraram a viabilidade de se usar esta técnica para medir a umidade de solo.

Palavras-chave: Espalhamento Compton, Monte Carlo, Detector de cintilação; Umidade de solo.

ABSTRACT

Geometric parameters optimization of a nuclear probe for water soil content measurements by Compton scattering using MCNP code

The aim of this study was to do a theoretical and experimental study of a nuclear probe calibration for soil water content measurements. For that, an experiment was done to measure the water soil sample content using a nuclear probe and cylindrical samples (soil and sand) with a 3,0 cm radius and a 10,0 high. The nuclear probe was constituted by a 5,0 cm high aluminum cylindrical, in which an Americium-241 radioactive source, a plumb shield and a plastic scintillator was axially located. This detector was joined to a liquid light guide, which was joined to a photomultiplier tube. When a beam of radiation coming from the source reaches the soil sample, it is scattered by Compton effect and measured by a NaI(Tl) scintillator. Some simulations were done using MCNP code to find the most efficient system geometry, considering the appropriated shield, distance between source and detector and sample dimensions. The detector sensibility was also studied by this code when water was introduced to the soil sample. After the best geometry choice, the experimental soil samples received amount of water corresponding to the water soil content variation between 0 and 25%. Ten measurements took place for each soil sample and it took 300 seconds. The water soil content was correlated to the radiation counting number. Linear correlation coefficient between them was 0,98 for soil and 0,99 for sand. The results showed the viability of the nuclear probe use to make water soil content measurements.

Keywords: Compton Scattering, Monte Carlo code, Scintillation Detector; Water soil content.

INTRODUÇÃO

O solo é uma estrutura complexa e sua pesquisa em ciência é interdisciplinar, englobando conhecimentos da química, física e biologia para o seu melhor entendimento. Constitui a parte mais importante da geosfera, de onde provém a maior parte dos nossos alimentos (DALMOLIN *et al.*, 2005; SENA *et al.*, 1999).

A análise do solo tem por objetivo avaliar os parâmetros químicos (concentração de metais e nutrientes, pH, etc), físicos (compactação, umidade, etc) e biológicos (microorganismos, etc), os quais indicam a sua qualidade (SENA *et al.*, 1999). Na agricultura, a medida do conteúdo de água no solo é a informação mais importante, necessária para planejar a irrigação ou drenagem, de forma a visar o aumento da produção agrícola (TEIXEIRA, *et al.*, 2005).

Existem vários métodos para determinar o conteúdo volumétrico de água no solo. Os métodos diretos fornecem de forma direta os valores de umidade de solo, como por exemplo, o método gravimétrico. Os métodos indiretos necessitam de calibração e tomam como base medidas da moderação de nêutrons, da constante dielétrica do meio ou da tensão da água nos solos (TEIXEIRA E COELHO; 2005).

A utilização do espalhamento Compton coerente e incoerente de fontes de Am-241 (60 keV) para a realização destas medidas constitui o princípio básico de uma técnica nuclear para medida da umidade dos solos. Este efeito é caracterizado pela interação da radiação com a matéria e dependerá da composição da amostra do solo, uma vez que o espalhamento Compton depende do tipo de material, do seu número atômico e sua densidade. Uma sonda nuclear constituída por uma fonte de radiação gama de 60 keV quando introduzida em uma amostra de solo, acoplada a um detector apropriado, faz as contagens dos fótons espalhados. Para amostras de solo de mesma composição e densidade, estas contagens dependem somente da quantidade de água presente nas mesmas (AGUIAR, 2006).

O objetivo deste trabalho foi obter a curva de calibração umidade *versus* contagem de uma sonda nuclear e realizar um estudo teórico através do código MCNP 4C.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Características gerais dos solos

1.1.1 Constituição

O solo é um material sólido e poroso. A parte sólida, denominada matriz de solo, é formada principalmente por partículas minerais e substâncias orgânicas, e a porosa é formada por poros ocupados por ar e água. A fração mineral é formada por partículas de tamanhos variáveis, sendo a argila, silte e areia as partículas primárias do solo. A fração argilosa do solo é formada principalmente por argilas silicatadas e oxídicas (óxidos, hidróxidos e oxidróxidos, de Fe e de Al) (RESENDE, 2002).

Os solos minerais são aqueles que contêm mais de 85% de matéria mineral e os solos orgânicos são aqueles que contêm mais de 15% de matéria orgânica. O solo é o substrato principal da produção de alimentos e uma das principais fontes de nutrientes e sedimentos que vão para os rios, lagos e mares (LIBARDI, 1995).

O solo é função das influências ambientais do clima, organismos, material de origem e tempo. A quantidade de água, de nutrientes e de ar nos solos são fatores variáveis que condicionam diferentes produtividades das culturas; e suas diferenças, tais como cor, topografia, textura e utilização afetam os aspectos socioeconômicos (RESENDE, 2002).

1.1.2 Densidade

A densidade ρ dos solos é um fator importante para o cálculo da fração do volume do solo ocupado pelos poros. É definida como a razão entre a massa total e o volume total da amostra de um solo, considerando o espaço ocupado pelos poros.

$$\rho = \frac{m}{V} (\text{kg.m}^{-3}) \quad (1)$$

Onde m é a massa total de solo presente na amostra e V o volume total presente na mesma.

Quanto mais argiloso for o solo, menor será a sua densidade. Para os solos arenosos, a densidade varia entre 1300 e 1800 kg.m^{-3} . Já para os solos argilosos, este valor varia entre 1000 e 1400 kg.m^{-3} (LIBARDI, 1995).

1.1.3 Porosidade

Os poros são pequenos espaços vazios em determinada massa de solo, ilustrados na Figura 1. Ao adicionar-lhe água, esta se infiltra com maior ou menor rapidez. O número de poros, tamanho e distribuição variam de solo para solo. Os microporos têm o diâmetro menor do que 0,05 mm e é encontrado em grande quantidade em um solo argiloso. Os macroporos têm diâmetro maior que 0,05 mm e sua presença significativa em um solo o caracteriza como solo arenoso. A porosidade do solo está diretamente relacionada com o ar e a água presentes no mesmo.

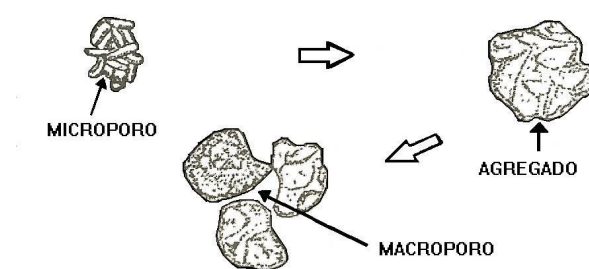


Figura 1: Ilustração dos tipos de poros de um solo (RESENDE *et al.*, 2002).

A maior parte da água disponível no solo se encontra nos poros cujos diâmetros medem aproximadamente 1,0 μm . Nos solos muito compactados, ocorre menor infiltração de água, maior erosão, menor crescimento de raízes e menor taxa de difusão de alguns elementos, como o fósforo, por exemplo.

Quando o espaço poroso de um determinado solo está totalmente cheio de água, diz-se que este solo está saturado. Por outro lado, o solo não saturado caracteriza-se pela ocupação dos poros por água e ar (RESENDE *et al.*, 2002). A saturação de uma fração de solo pode ser vista na ilustração da Figura 2.

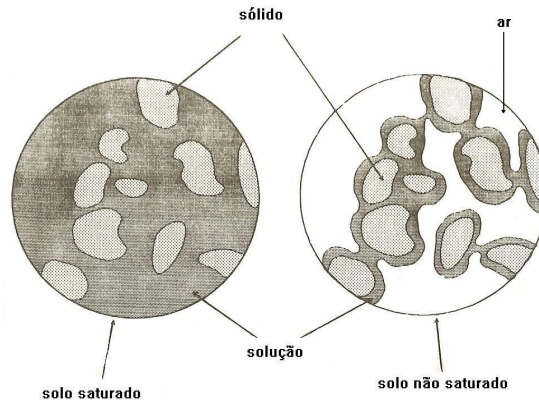


Figura 2: Ilustração comparativa entre um solo saturado e um não saturado (RESENDE *et al.*, 2002).

A fração do volume do solo ocupado pelos poros, denominada porosidade do solo α , pode ser facilmente calculada através das equações 2 e 3.

$$\alpha = \frac{V - V_s}{V} \quad (2)$$

Onde V é o volume total do solo e V_s é volume da parte sólida do solo

ou

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (3)$$

Onde ρ é a densidade do solo e ρ_s é a densidade do sólido do solo, cujo valor encontrado na literatura é de 2650 kg.m⁻³ (LIBARDI, 1995).

A porosidade de aeração α_a , fração do volume do solo ocupado pelo ar, pode ser expressa através da equação 4:

$$\alpha_a = \frac{V_{ar}}{V} \quad (4)$$

Onde V_{ar} é volume de ar presente no interior da amostra de solo e V é o volume total da amostra.

1.1.4 Umidade

A umidade do solo refere-se a um índice que quantifica a água que uma dada amostra de solo possui e pode ser expresso de duas maneiras: à base de massa (U) e à base de volume (θ). A primeira maneira é baseada no cálculo da razão entre a massa de água e a massa de sólido presentes em uma dada amostra de solo (equação 5).

$$U = \left(\frac{m - m_s}{m_s} \right) \quad (5)$$

Onde m é a massa de solo úmido presente na amostra de solo e m_s a massa dos sólidos presentes na mesma.

A expressão da umidade do solo à base de volume é a razão entre o volume de água presente em uma determinada amostra de solo e o volume da amostra, de acordo com a equação 6.

$$\theta = \frac{V_a}{V} \quad (6)$$

Onde V_a é volume de água presente no interior da amostra de solo e V é o volume total da amostra.

Observa-se que, ao somar as equações 6 e 4, e que:

$$\frac{V_a}{V} + \frac{V_{ar}}{V} = \frac{V_a + V_{ar}}{V} = \alpha$$

Mas como,

$$\frac{V_a}{V} = \theta \quad \text{e} \quad \frac{V_{ar}}{V} = \alpha_a$$

Vem que:

$$\alpha = \alpha_a + \theta \tag{7}$$

Observa-se, de acordo com a equação 7, que o valor máximo de porosidade corresponde ao solo completamente seco, ou seja, se $\alpha = \alpha_a$, então $\theta = 0$. Por outro lado, se $\alpha = 0$, ou seja, se a porosidade for nula, então o solo estará saturado ($\alpha_a = 0$) (LIBARDI, 1995).

1.2 Principais métodos de medida de umidade de solo

Alguns métodos podem ser utilizados para medir a umidade do solo. Dentre os existentes, os que mais se destacam são: o método gravimétrico, que fornece de forma direta os valores de umidade de solo; e os métodos indiretos, que tomam como base, por exemplo, medidas da moderação de nêutrons, da constante dielétrica do solo, do espalhamento da radiação gama. É importante ressaltar que os métodos indiretos de medida de umidade do solo necessitam calibração (TEIXEIRA E COELHO, 2005).

O método gravimétrico consiste basicamente em medir a massa de um solo úmido, colocá-lo em uma estufa à temperatura de 105°C até sua secagem e obter a massa de água dada pela diferença entre a massa de solo seco e a massa de solo úmido. A desvantagem deste método é o de ser destrutivo, uma vez que necessita de ferramentas de torção para entrar no

solo e retirar a amostra, dificultando, por exemplo, a determinação das variações do teor de água do solo em um mesmo ponto durante o ciclo de uma cultura, (ANDRADE *et al.*, 2001).

O método da moderação de nêutrons utiliza uma fonte de nêutrons rápidos, cujas energias variam de 10keV a 20 MeV (geralmente fontes de amerício-berílio). Estes nêutrons são termalizados pelos átomos de hidrogênio do solo e detectados através de um detector sensível somente a nêutrons térmicos, do tipo BF₃ ou He₃, colocado a uma distância de alguns milímetros da fonte (LIBARDI, 1995). Após obter a curva de calibração umidade *versus* contagem, pode-se determinar a umidade em qualquer profundidade do perfil do solo no campo, de maneira não destrutiva. O número de nêutrons detectados é diretamente proporcional à sua umidade. Apesar de ser um método não destrutivo, possui um equipamento caro, sensível e de difícil manutenção, além de cuidados devido à fonte e necessidade de calibração (RANDRUP, LICHTER, 2001).

A técnica de reflectometria no domínio do tempo TDR (Time Domain Reflectometry) consiste basicamente em medir o tempo de deslocamento de uma seqüência de pulsos que possuem harmônicos na frequência de microondas em uma linha de transmissão, composta de duas hastes de aço e comprimento conhecido, introduzidas no solo. Como a água tem constante dielétrica relativa bem maior que a dos materiais do solo e do ar, quanto maior o conteúdo de água do solo, maior será a sua constante dielétrica aparente e maior será o tempo de deslocamento do pulso aplicado, já que a maior parte do efeito do retardamento do pulso na antena é decorrente do conteúdo de água no solo (TOMMASELLI E BACCHI; 2000).

A técnica de medida de umidade do solo que emprega a atenuação da radiação gama no solo consiste em medir a radiação gama espalhada utilizando uma configuração fonte-solo-detector. Nesta configuração, feixes colimados de raios gama atravessam a amostra de solo. Alguns raios passam sem sofrer interação, enquanto outros são espalhados, ou seja, desviados da trajetória original (RESENDE *et al.*, 2002).

1.3 Medida de umidade por meio de espalhamento Compton

Pode-se 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).

O efeito Compton, um dos efeitos provenientes da interação da radiação gama com a matéria, 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).

Pode-se considerar a medida da umidade do solo como uma medida da densidade úmida de um solo. Assim, o aumento da umidade em uma amostra de solo causa um aumento do número das contagens espalhadas, pois oxigênio e hidrogênio são elementos leves em relação à maioria dos elementos do solo (AGUIAR, 2006).

1.4 Interação da radiação gama com a matéria

Devido ao caráter ondulatório da radiação eletromagnética, bem como a ausência de carga e massa de repouso, esse tipo de radiação, ao penetrar um material, pode percorrer grandes espessuras até sofrer a primeira interação. Apesar de haver vários mecanismos possíveis de interação da radiação gama com a matéria, três deles são considerados mais importantes para fins de medidas de radiação, os quais são: a absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares (KNOLL, 1989).

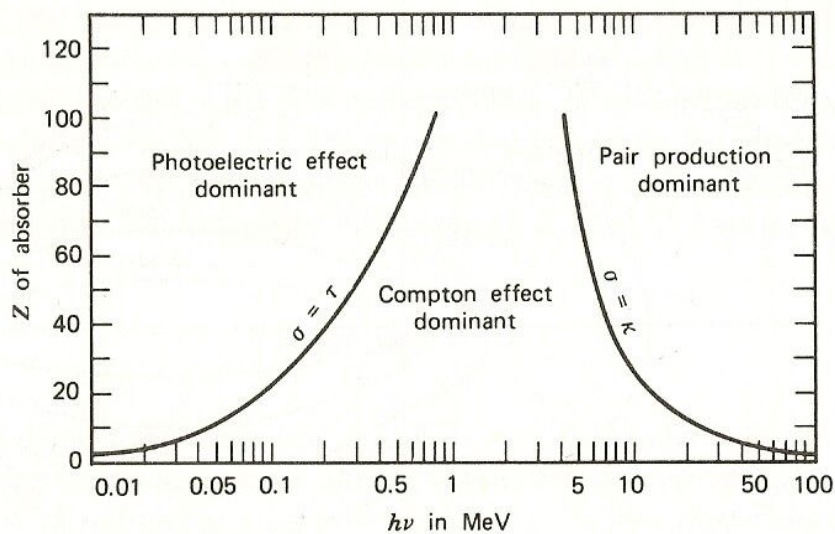


Figura 3: Predominância dos principais mecanismos de interação da radiação gama com a matéria (KNOLL, 1989).

A curva da esquerda, na Figura 3, mostra valores de energia nas quais o Efeito Fotoelétrico e o Efeito Compton tem probabilidades iguais de ocorrência, em função do número atômico do átomo absorvedor. A curva da direita representa a energia na qual o Efeito Compton e a Produção de Pares têm probabilidades iguais de ocorrência (KNOLL,1989).

1.4.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência de energia de um fóton incidente a um elétron orbital, o qual é expelido com uma energia cinética E_c dada pela equação 8.

$$E_c = h\nu - B_e \quad (8)$$

Onde h é a constante de Planck, cujo valor encontrado na literatura é $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

Os fótons absorvidos neste processo devem estar ligados aos átomos para que a força de ligação transmita momento para o átomo. Devido à grande massa de um átomo, quando comparada com a do elétron, o sistema pode absorver uma grande quantidade de momento sem adquirir uma quantidade significativa de energia. O efeito só é possível porque existe uma partícula pesada recuada, além do elétron ejetado (EISBERG E RESNICK;1995). A absorção fotoelétrica é o modo de interação predominante para baixas energias (Figura 4). Este processo é também favorecido para materiais absorvedores ou de alto número atômico Z (KNOLL,1989).

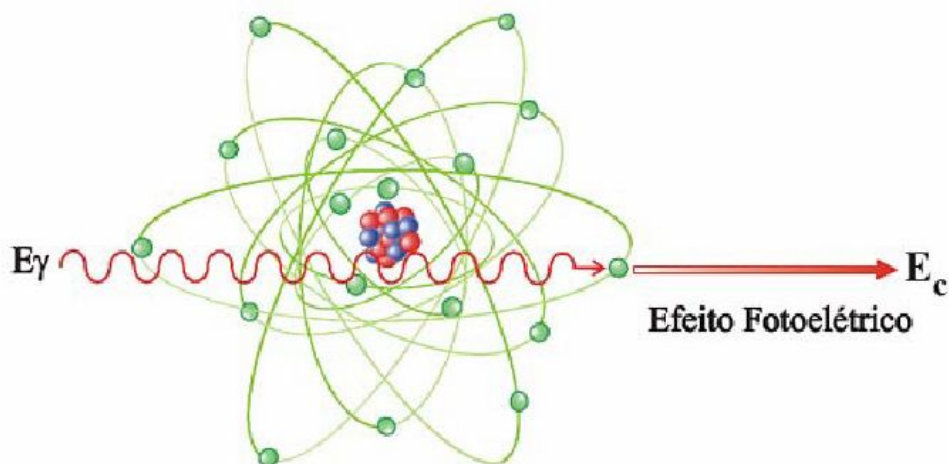


Figura 4: Representação do efeito Fotoelétrico (TAUHATA *et al.*,2003).

1.4.2 Efeito Compton

O efeito Compton é um mecanismo de interação da radiação gama com a matéria no qual o fóton incidente é defletido por um ângulo de θ referente à sua posição inicial após colidir com um elétron do material absorvedor (Figura 5). O fóton transfere parte de sua energia ao elétron (inicialmente em repouso), conhecido como elétron recuado. Devido à possibilidade de ocorrer espalhamento em todos os ângulos, a energia transferida ao elétron pode variar de zero a uma fração grande da energia do raio incidente.

Observa-se, a partir da análise da Figura 3, que a predominância do Efeito Compton ocorre para baixas energias e baixo número atômico do átomo absorvedor.

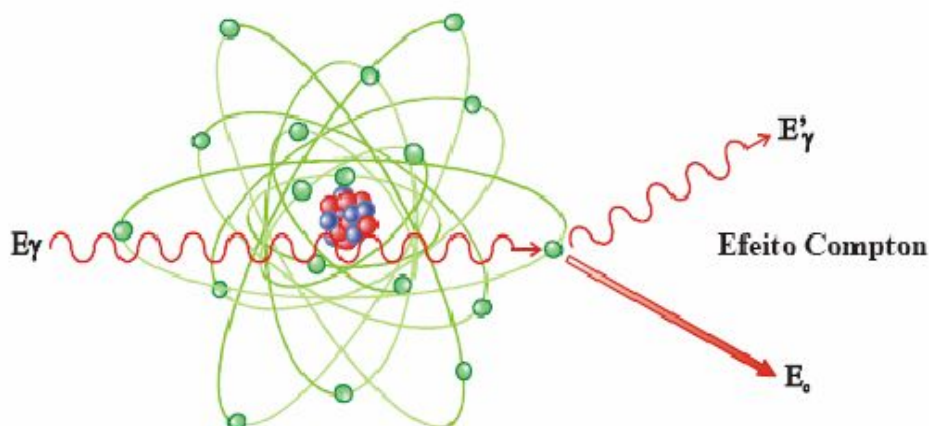


Figura 5: Representação do efeito Compton (TAUHATA *et al.*,2003).

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 momento. Ela pode ser descrita como:

$$E' = \frac{E}{1 + \left(\frac{E}{E_0}\right)(1 - \cos \alpha)} \quad (9)$$

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 (KNOLL,1989).

1.4.3 Produção de pares

A produção de pares ocorre quando um fóton de alta energia colide com um núcleo e perde toda a sua energia $h\nu$, criando um par elétron-pósitron, com uma determinada energia cinética. Neste efeito, a energia de recuo absorvida pelo núcleo é desprezível devido à sua grande massa. A energia mínima necessária para que um fóton crie um par é de $2m_0c^2$ ou 1,02 MeV (10^6 eV). Este mecanismo de interação é um excelente exemplo da conversão de energia radiante em massa de repouso e energia cinética (EISBERG E RESNICK,1995).

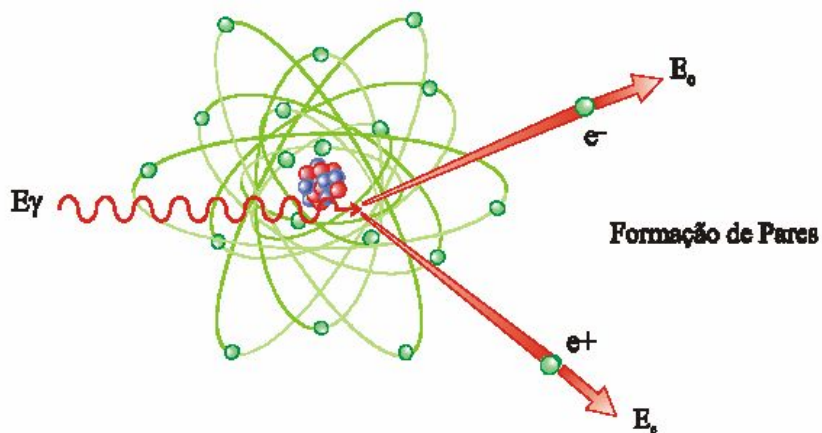


Figura 6: Representação do efeito de formação de pares (TAUHATA *et al.*,2003).

1.4.4 Atenuação da radiação gama

Quando a radiação eletromagnética interage com um material de uma determinada espessura, parte do feixe é espalhada, parte é absorvida pelos processos descritos anteriormente e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade I do feixe emergente se relaciona à intensidade I_0 do feixe incidente através da seguinte relação:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu T \cdot x} \quad (10)$$

Onde μ é a probabilidade do feixe sofrer atenuação, denominado coeficiente de atenuação linear total, devido aos processos pelos quais a radiação interage com a matéria (KNOLL, 1989).

De uma maneira geral, quando um feixe de fótons penetra em um meio qualquer, existe a probabilidade de parte destes fótons interajam por efeito Compton. Os fótons espalhados podem ser considerados como uma fonte de fótons distribuída ao longo do meio de maneira não-uniforme. Estes fótons secundários podem por sua vez produzir fótons terciários e assim por diante. Esta fonte de fótons espalhados não pode ser determinada por modelos físicos, mas somente por modelos estocásticos do tipo Monte Carlo.

1.5 Os detectores de cintilação e o guia de luz

Os detectores de cintilação são constituídos de materiais que produzem luz quando excitados pela passagem de partículas carregadas e devido à sua maior densidade, são mais eficientes para detecção de radiação gama do que os detectores gasosos.

Quando fótons incidem sobre um material cintilador, ocorrem interações e os elétrons resultantes dissipam sua energia no cintilador. Parte desta energia é convertida em fótons de luz e a restante 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, entre 400 e 700 nm (KNOLL, 1989). As cintilações produzidas pelas radiações nos cristais cintiladores são amplificadas em um tubo fotomultiplicador gerando um pulso elétrico que é detectado por detector (MAZZILLI *et al.*, 2002). A altura do pulso é proporcional à energia da radiação depositada sobre o detector. 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 (KNOLL, 2002).

Os cintiladores inorgânicos são constituídos geralmente por elementos de Z elevado e têm uma densidade elevada, enquanto os cintiladores orgânicos são constituídos de elementos de baixo Z e têm uma densidade baixa. Dessa forma, o mecanismo principal da interação é o espalhamento Compton. O uso principal de cintiladores plásticos é para detecção de raios gamas com energia acima de 100 KeV. O limite da energia pode ser reduzido usando um tubo fotomultiplicador de baixo ruído e um fotosensor.

O guia de luz é composto por um tubo, como uma mangueira constituída de três camadas: a primeira veda a luz externa, a segunda é feita de metal e protege o guia de luz em seu interior e a terceira é um polímero cheio de um líquido cristalino, homogêneo e transparente, cuja função é guiar um feixe de luz através de um trajeto qualquer. O material da canalização interna deve ter um índice de refração baixo, menor do que o da água. Dentre os mais comuns se encontram o dissulfeto de carbono ou as misturas de solventes aquosos que contenham grande quantidade de álcool ou glicol (ALTKORN *et al.*, 1999).

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, o qual pode ser revestido por alumínio, borracha, PVC ou aço galvanizado. O uso de flúor polímero é recente e está disponível no mercado com o nome de Teflon AF. É transparente para uma faixa de comprimento de onda entre 20 e 2000 mm e seu índice de refração é de 1,29 (ALTKORN *et al.*, 1999).

O guia de luz provê os requerimentos de flexibilidade e durabilidade em aplicações manuais e automatizadas. Ele permite a transmissão dos fótons do cintilador para o foto catodo com perdas praticamente desprezíveis através da reflexão total (AGUIAR, 2006).

1.6 Código Computacional MCNP

O código computacional MCNP (Monte Carlo N-particle) é um método de simulação onde as distribuições de probabilidades que governam cada evento são estatisticamente

amostradas para a descrição total do fenômeno. Ele se aplica aos sistemas de partículas como fótons, elétrons ou nêutrons. A simulação consiste em acompanhar cada partícula desde a sua criação na fonte, ao longo de sua vida, até a sua morte por absorção ou escape do sistema. (DUFEK, 2004).

O método de Monte Carlo é bem diferente dos métodos de transporte determinísticos. Estes resolvem a equação de transporte através do comportamento médio da partícula, enquanto o método de monte Carlo obtém respostas através de simulações individuais das partículas. Ele utiliza uma biblioteca de energia nuclear e dados atômicos. As principais fontes de dados nucleares são as avaliações do ENDF (Evaluated Nuclear Data File), do ENDL (Evaluated Nuclear Data Library) e do ACTL (Activation Library). A geometria do MCNP trata de qualquer configuração tridimensional de materiais definidos pelo usuário em células geométricas limitadas por superfícies de primeiro e segundo grau ou tori elíptico de quarto grau (BRIESMEISTER; 2000).

O modelo de transporte mais adequado para os fótons é aquele no qual as partículas são acompanhadas de evento em evento e o próximo evento é sempre tomado como amostra, utilizando um gerador de números aleatórios para um número de possíveis próximos eventos, de acordo com as probabilidades de cada um. Devido ao espalhamento e ao longo alcance da interação coulombiana, o número de colisões na história de uma partícula tipicamente carregada é enorme (da ordem de 10^6).

Um importante componente da técnica de monte Carlo é a amostra numérica de variáveis aleatórias a partir de uma dada função de distribuição probabilística (PDF-Probability distribution function). Em geral, a simulação analógica do fóton no MCNP pode ser realizada em quatro etapas principais, usados no MCNP: (1) a escolha aleatória da distancia até a próxima interação, de acordo com a sessão de choque total do fóton; (2) o transporte para o local da interação, considerando as restrições na geometria; (3) A escolha aleatória do mecanismo de interação, de acordo com a sessão de choque do fóton nos processos competitivos; (4) a escolha aleatória do resultado da interação em termos do ângulo e energia do espalhamento, de acordo com a sessão de choque diferencial do fóton correspondente ao mecanismo de interação.

A simulação requer que a distância até a próxima interação seja recalculada quando o fóton atravessar a interface entre dois materiais distintos. O código utiliza um tratamento físico detalhado em suas simulações. Ele inclui o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton, a produção de pares e também leva em consideração os fótons fluorescentes provenientes da absorção fotoelétrica (BRIESMEISTER; 2000).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Simulações do experimento

O código nuclear MCNP 4C foi utilizado com o objetivo de otimizar a geometria do sistema utilizado para medir a umidade de solo, estudar a relação entre radiação espalhada e contagem à medida que se insere água à amostra de solo e estudar a sensibilidade dos principais elementos presentes no mesmo.

2.1.1 *Elaboração e otimização da geometria do sistema*

O sistema utilizado no experimento para medir a umidade do solo é constituído por uma sonda nuclear e uma amostra de solo de geometria cilíndrica. A sonda nuclear é formada por uma fonte de Am-241 emissora de radiação gama, um plástico cintilador cilíndrico, um material espaçador de baixo coeficiente de atenuação linear localizado entre a fonte e o detector e um guia líquido de luz (Figura 7.A). Um feixe de radiação proveniente da fonte é espalhado por Efeito Compton ao interagir com o solo. A radiação espalhada é então detectada pelo cintilador. Para que a radiação espalhada atinja o detector é necessário que o ângulo de espalhamento (Figura 7.B), aqui definido como o ângulo formado entre a radiação incidente e a perpendicular em relação à blindagem, seja tal que a radiação não colida com a blindagem nem ultrapasse o limite de detecção. O valor deste ângulo está relacionado com a distância entre a fonte e a blindagem.

A geometria do sistema é construída no MCNP 4C definindo-se volumes específicos, os quais são obtidos através de interseção e união de regiões limitadas por superfícies, também definidas pelo usuário. Cada volume pode ser preenchido com qualquer material ou pelo vácuo. Dessa forma, a entrada de dados deve conter informações a respeito da geometria do sistema, dos materiais constituintes, das sessões de choque nas livrarias disponíveis, da localização e das características da fonte radioativa, bem como do tipo de respostas desejadas (APÊNDICE).

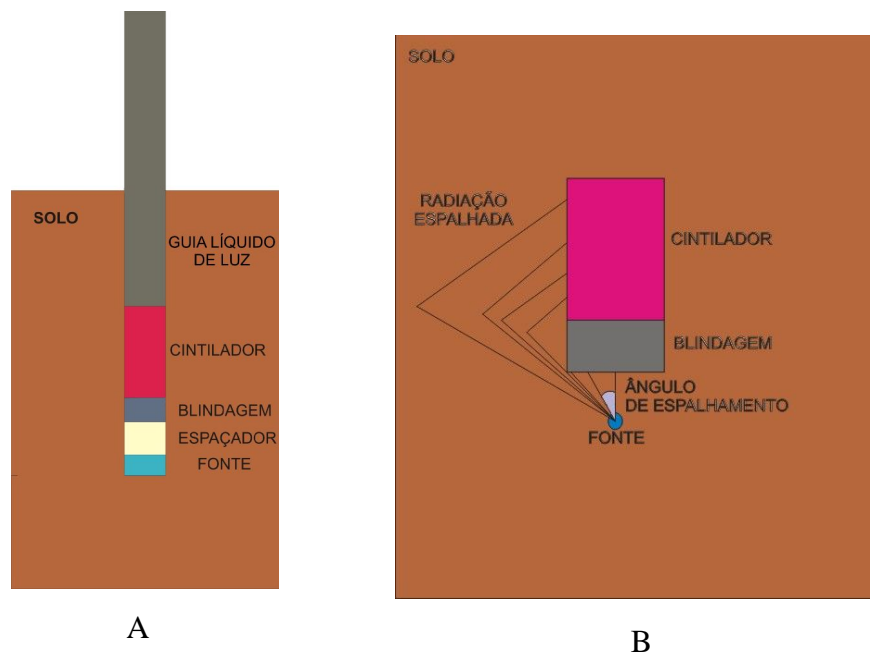


Figura 7: (A)Esquema ilustrativo da geometria dos sistemas simulados: sonda nuclear (fonte, espaçador, blindagem e cintilador) e guia líquido de luz, (B)Detalhes do espalhamento Compton: a radiação proveniente da fonte

A geometria otimizada corresponde àquela que apresentasse a maior detecção de fótons espalhados, para que pudesse ser reproduzida experimentalmente. Com este intuito, diversas simulações do experimento foram realizadas, variando-se a altura e diâmetro da amostra de solo, a espessura da blindagem e a distância entre a fonte e o detector (Tabela 1).

Tabela 1
Variação das dimensões dos elementos do sistema simulado.

Parâmetros	Variação
Espessura da blindagem	0,1 ~ 0,5 cm
Distancia entre a fonte e a blindagem	0 ~ 1 cm
Altura da amostra de solo	9 ~ 20 cm
Diâmetro da amostra de solo	2 ~ 18 cm

Para simular o comportamento de um feixe de radiação em um determinado sistema através do código MCNP 4C após a modelagem do sistema desejado, insere-se dados no arquivo de entrada que especifica a fonte e define os resultados desejados (APÊNDICE).

2.1.2 Amostra de solo

Foram utilizados dois tipos diferentes de solo para a realização deste trabalho: areia e latossolo vermelho. A areia foi adquirida em loja de material de construção e é comumente conhecida por areia lavada, cuja composição é basicamente SiO_2 .

A amostra de solo foi coletada na camada de 10-30 cm, na Estação Ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Esta amostra é de um solo caracterizado como Latossolo Vermelho, de acordo com a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), e representa o solo localizado na região metropolitana de Belo Horizonte.

Após sua obtenção, a amostra de solo foi enviada ao Laboratório de Química Agropecuária (LQA), do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA) para análise completa.

As amostras de solo, bem como as de areia, no arquivo de entrada do código MCNP 4C, são representadas através de suas constituições químicas, nas quais os elementos constituintes do material estão presentes em suas respectivas proporções (APÊNDICE).

2.1.3 Fonte utilizada

A fonte radioativa emissora de radiação gama utilizada no experimento foi a de Amerício-241 de atividade 518 MBq (14mCi), cujas dimensões são: 0,7 cm de diâmetro externo com 0,5 cm de diâmetro ativo e 1,0 cm de comprimento. Ela é incorporada a uma esfera cerâmica, selada e soldada em cápsulas de aço inoxidável.

Para a simulação do experimento, considerou-se a fonte pontual, localizada na origem do sistema de coordenadas espaciais (APÊNDICE). As suas características principais estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2

Características da fonte radioativa utilizada nas simulações.

Fonte radioativa	Z	Meia-Vida	E_{γ} (keV)
Am-241	95	432 anos	59,5

Fonte: WWW Table of Radioactive Isotopes, 2002. Disponível em: <<http://ie.lbl.gov/toi/nucSearch.asp>>. Acesso em: 08 mar. 2007.

A escolha da utilização desta fonte é justificada pela segurança que ela oferece em seu manuseio, de acordo com as normas de radioproteção estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A abundância de gamas de baixa energia (60 keV) emitidas pela fonte de amerício-241 está ilustrada na Figura 8. A baixa energia da radiação que acompanha o decaimento alfa do Am-241 faz com que esta fonte seja uma excelente opção para a utilização na sonda nuclear. E como é necessário um sistema mais compacto para que a sonda seja introduzida no solo, uma fonte emissora de fótons de baixa energia reduz a espessura da blindagem necessária para proteger o usuário, pois é facilmente blindada por uma camada de espessura pequena de chumbo, facilitando o seu manuseio.

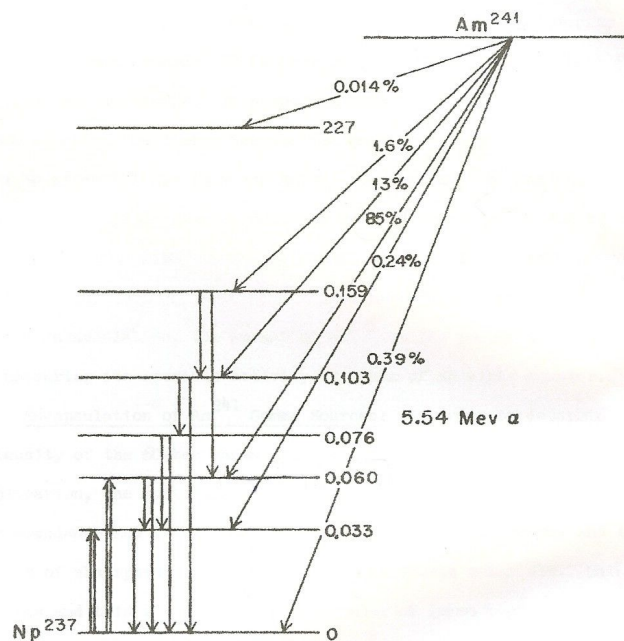


Figura 8: Esquema de decaimento da fonte de Amerício-241. (HOFFMAN E DROPESKY; 1958)

2.1.4 Dados de entrada

O teor de água contido nas amostras modeladas no código MCNP 4C variou de $\theta = 0\%$ a $\theta = 25\%$, de 5 em 5%, para que a curva umidade *versus* fluxo de gamas fosse obtida. Para isso, obteve-se, a partir da equação 6, a fração correspondente à parte mineral do solo e a correspondente à parte porosa, e em seguida, inseriu-se quantidades crescentes de H₂O, correspondentes aos valores acima, mantendo-se a matriz de solo invariável. A Tabela 3 mostra a variação da quantidade de água nas amostras.

Tabela 3
Dados de entrada para a amostra computacional de solo

α (%)	H (%)	O (%)
0	1,943474	17,28141
5	5,243474	18,98141
10	8,543474	20,68141
15	11,84347	22,38141
20	15,14347	24,08141
25	18,44347	25,78141

2.1.5 Estudo da sensibilidade dos principais elementos presentes no solo

Para estudar a sensibilidade dos principais elementos presentes na amostra de solo, os elementos magnésio ($Z = 17$), ferro ($Z = 26$), alumínio ($Z = 13$) e silício ($Z = 14$) tiveram suas frações variadas, aumentando de 0 a 20% em relação à sua quantidade inicial, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4**Varição das frações dos principais elementos presentes no solo estudado.**

Varição da fração (%)	Magnésio (%)	Ferro (%)	Alumínio (%)	Silício (%)
0	0,19623	1,242793	3,493202	11,0988
5	0,206042	1,304933	3,667862	11,6537
10	0,215854	1,367072	3,842522	12,2086
15	0,225665	1,429212	4,017182	12,7636
20	0,235477	1,491352	4,191842	13,3185

2.2 Arranjo Experimental

O arranjo experimental teve como objetivo obter a curva de calibração umidade *versus* contagem da sonda nuclear medidora de umidade de solo tanto para o solo quanto para a areia, reproduzindo-se experimentalmente a geometria mais eficiente pra tal finalidade, encontrada através das simulações realizadas no código MCNP.

2.2.1 Montagem do experimento

O sistema montado para a realização do experimento está ilustrado na Figura 9 e constituiu-se de uma sonda nuclear composta por um espaçador de borracha, blindagem de chumbo, fonte de Amerício-241, cintilador plástico e guia líquido de luz; uma amostra de solo; um tubo fotomultiplicador e uma placa de aquisição de dados.

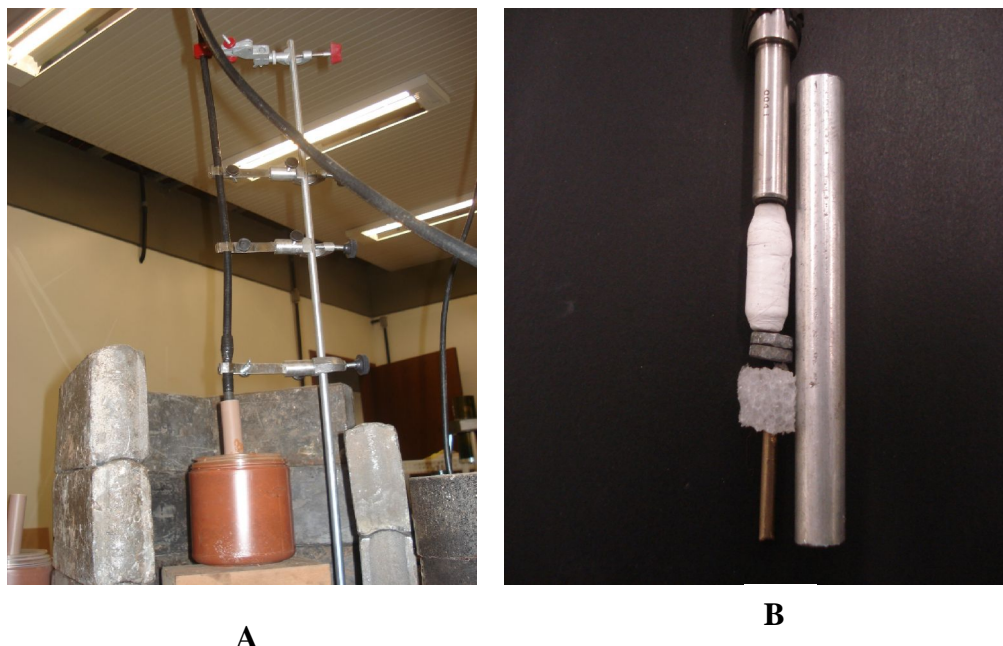


Figura 9: Foto da montagem do experimento. (A) Amostra de solo no recipiente plástico, sonda nuclear dentro do tubo de PVC e guia líquido de luz. (B) Detalhes da sonda nuclear: fonte, espaçador, blindagem, cintilador e guia líquido.

A sonda nuclear foi montada com o objetivo de ser compacta e resistente para futuramente poder ser utilizada em medidas de campo. Para isso, os elementos: fonte, espaçador, blindagem e cintilador, foram dispostos seqüencialmente em um tubo de alumínio de diâmetro aproximadamente igual a 0,7 cm. A blindagem entre a fonte e o detector permitiu blindar as radiações emitidas pelas fontes primárias, garantindo que apenas as secundárias atingissem o cintilador. O espaçador localizado entre a fonte e a blindagem teve a finalidade de garantir o ângulo ótimo de espalhamento (Figura 7.B) para que a radiação espalhada atingisse o detector.

A sonda foi inserida no orifício aberto por um tubo de PVC na área central da amostra de solo e a radiação, ao interagir com o solo, sofreu espalhamento Compton. Os fótons espalhados atingiram o detector e o guia líquido de luz os transportou para a célula fotomultiplicadora. Os dados foram coletados através da placa de aquisição de dados.

2.2.2 Preparação da amostra experimental de solo

As amostras de solo foram previamente preparadas para que a umidade pudesse ser variada. O latossolo e a areia foram levados à estufa a 105° C por 48h e em seguida foram peneirados em malha de 0,2 cm.

Em seguida, eles foram armazenados em recipientes plásticos de 10,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura. Em cada amostra introduziu-se um tubo de PVC com uma das extremidades fechada por uma borracha. Este tubo foi fixado no centro de cada recipiente com o objetivo de servir de guia para a introdução da sonda nuclear, como pode ser visto na figura 10.



Figura 10: Foto da amostra de solo utilizada no experimento.

2.2.3 Detector de cintilação

O detector cintilador utilizado no arranjo experimental foi o NE-102A, equivalente aos cintiladores RP-400 da REXON e ao BC-400 da BICRON. A base deste cintilador é de PoliVinilTolueno com índice de refração de 1,58 e densidade 1,032 g.cm⁻³. Há várias vantagens na utilização deste tipo de detector, tais como alto desempenho, facilidade no manuseio, estabilidade mecânica e baixo custo.

O cintilador foi encapado com fita de teflon para que pudesse ser fixado com segurança no tubo de alumínio. A Figura 11 mostra a foto do cintilador plástico utilizado.



Figura 11: Foto do cintilador utilizado no experimento: à esquerda, sem a capa de teflon; à direita, com a capa.

2.2.4 Guia líquido de luz

O guia líquido de luz utilizado no experimento é composto por um tubo de resina do tipo Teflon AF cujo índice de refração é de 1,29, fabricadas pela Du Pont, preenchido com etileno glicol, de índice de refração igual a 1,43. A sua característica principal é a baixa perda de fótons do cintilador para o fotocátodo, devido à sua transparência e baixo índice de refração.



Figura 12: Foto do guia líquido de luz utilizado no experimento.

2.2.5 Acoplamento do guia líquido de luz à fotomultiplicadora

A fotomultiplicadora foi coberta por uma película de 0,2 cm de teflon com um orifício de aproximadamente 0,8cm, cuja função foi refletir os fótons residuais. Em seguida, o guia líquido foi conectado a ela através de uma peça de alumínio, a qual permitiu a melhor acomodação e a estabilização do sistema. Todo o conjunto foi revestido por um tubo termorretrátil preto que vedou a passagem de luz e ofereceu estabilidade através da pressão exercida sobre o guia líquido de forma homogênea, impedindo seu deslocamento (Figura 13).



Figura 13: Foto do acoplamento do guia líquido de luz à fotomultiplicadora.

2.2.6 Placa de aquisição de dados

Os dados experimentais foram obtidos através da placa de aquisição de dados do tipo FMS Multi-Escale, que faz a contagem dos fótons gerando uma grande quantidade de dados em um tempo adequado para a análise estatística.

2.2.7 Medida da umidade das amostras experimentais de solo

As medidas de umidade das amostras foram realizadas em base de volume, de acordo com a Equação 6. A umidade das amostras de solo e de areia variou de 0% a 25%, aumentando de 5 em 5%. Cada valor de umidade correspondeu a um determinado volume de água, o qual foi adicionado ao recipiente preenchido pelo solo e pela areia, secos. Durante este processo, tomou-se cuidado para que o solo não fosse compactado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Otimização da geometria

A simulação do experimento através do código nuclear MCNP 4C permitiu a montagem do sistema levando-se em consideração a geometria mais eficiente para sonda. Para tanto, estudou-se primeiramente a relação entre espessura da blindagem e contagem de fótons espalhados para obter a espessura ótima. Mantendo-se esta espessura fixa, variou-se a distância entre a fonte e o detector, determinado-se a distância adequada. Mantendo-se fixos estes valores, variou-se o diâmetro e a altura da amostra de solo.

3.1.1 Dados de entrada referentes à amostra de solo

A análise laboratorial da amostra de solo utilizado tanto para a otimização do sistema como para a análise experimental revelou dispostas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5
Características química, física e mineralógica do solo estudado.

Característica	Quantidade
MO (%)	2,02
Al (10^{-2} mol L ⁻¹)	1,0
H ⁺ + Al (10^{-2} mol L ⁻¹)	2,62
Ca ²⁺ (10^{-2} mol L ⁻¹)	0,20
Mg ²⁺ (10^{-2} mol L ⁻¹)	0,10
K (10^{-2} mol L ⁻¹)	80
Fe (mg L ⁻¹)	34,10
Cu (mg L ⁻¹)	0,90
Areia (%)	35,64
Silte (%)	24,96
Argila (%)	39,40

Tabela 6
Composição percentual das argilas do solo.

Mineral	Composição (%)
Fe ₂ O ₃	16
Gibbsita	6
Caulinita	68
Argilas (2:1)	10

3.1.2 Espessura da blindagem

A primeira simulação realizada teve como objetivo obter a espessura mínima da blindagem de chumbo, localizada entre a fonte e o detector, para que a radiação primária proveniente da fonte fosse blindada.

Como a atenuação da radiação gama no ar é muito pequena, considerou-se o meio do sistema modelado como ar atmosférico. Desta forma, garantiu-se que a radiação contabilizada pelo detector de cintilação fosse apenas secundária, uma vez que todas as fontes primárias foram blindadas pelo chumbo. A relação entre a espessura da blindagem e o fluxo de fótons contabilizado está ilustrada na Figura 14.

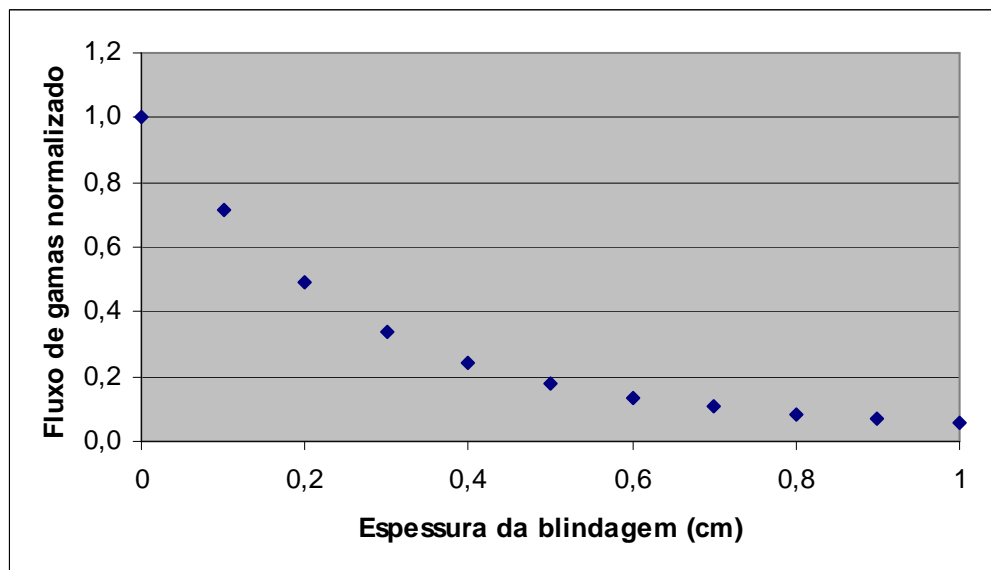


Figura 14: Relação entre o fluxo de gamas e a espessura da blindagem.

Observa-se que a espessura mínima da blindagem de chumbo necessária para blindar a fonte primária, pode ser considerada de 0,5 cm. Esta simulação confirma a segurança que a fonte emissora de 60 keV oferece, uma vez que uma espessura pequena de chumbo é capaz de blindá-la.

3.1.3 Distância entre a fonte e o detector

Após estudar a relação entre a espessura da blindagem e o fluxo de fótons que atingem o cintilador utilizando-se o ar como meio, estudou-se a relação entre a distância da fonte ao detector e o fluxo de fótons, desta vez utilizando-se o solo como meio. A distância variou de 0 a 1,4 cm e o objetivo desta simulação foi obter a distância na qual a contagem de fótons pelo detector fosse máxima.

Observou-se que, quando a fonte se aproxima da blindagem, uma grande parte da radiação emitida pela fonte é barrada pela blindagem (Figura 7.B). À medida que a fonte se afasta do cintilador, aumenta-se a incidência da radiação primária no solo e conseqüentemente a radiação secundária no detector. Desta forma, existe uma distância ótima, correspondente à maior contagem de fótons. O resultado desta simulação está disposto na Figura 15.

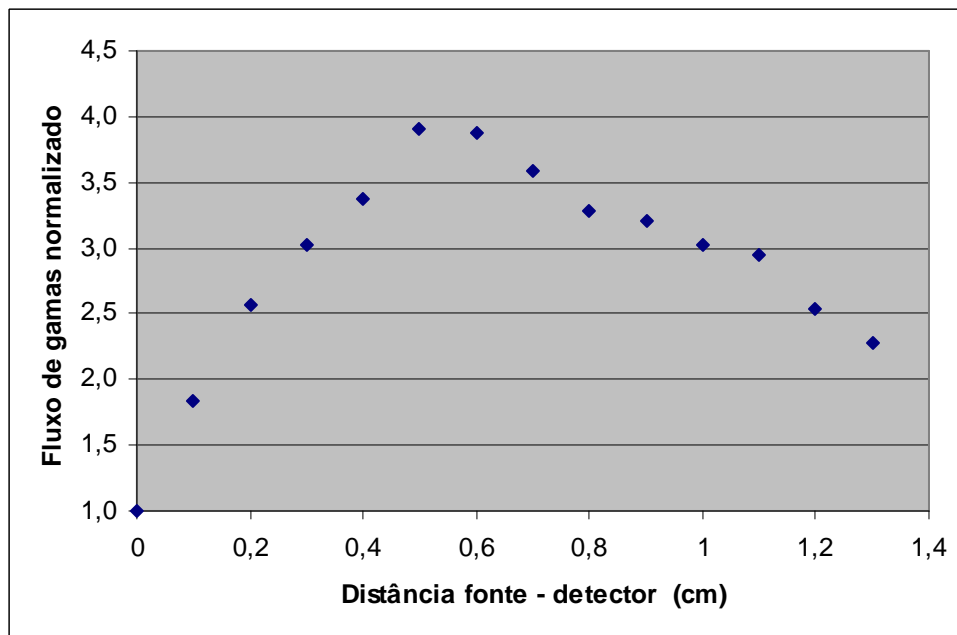


Figura 15: Relação entre o fluxo de gamas normalizado e a distância fonte-detector.

A distância ótima para localização da fonte de amerício ocorreu a 0,5 cm da blindagem. A partir desta posição, a radiação espalhada não mais atinge o detector, diminuindo assim o fluxo de fótons contabilizados.

3.1.4 Dimensões das amostras de solo

As dimensões da amostra de solo, altura e diâmetro, também foram estudadas, uma vez que sua geometria está diretamente relacionada com a contagem de fótons espalhados. Isso ocorre porque, tanto o detector quanto a fonte estão inseridas dentro da sonda e esta, dentro da amostra cilíndrica de solo, local onde as interações da radiação com o solo ocorrem em sua maioria, através do Efeito Compton. Desta forma, deve-se minimizar a quantidade de fótons que podem sofrer escape do sistema. Primeiramente variou-se o diâmetro da amostra de solo e em seguida, variou-se sua altura.

- **Diâmetro**

Ao variar o tamanho do diâmetro da amostra, observou-se que à medida que este parâmetro aumenta, o fluxo de fótons também aumenta até atingir o valor máximo quando o

diâmetro mede 6 cm. A partir desta medida, nenhum aumento do fluxo de fótons é observado. Isto ocorre porque, como a distância entre a fonte e o detector está fixa, o ângulo de espalhamento também é fixo, e para um diâmetro pequeno (menor que 6,0 cm), parte dos fótons provenientes da fonte secundária escapam do sistema. A Figura 16 ilustra esta relação.

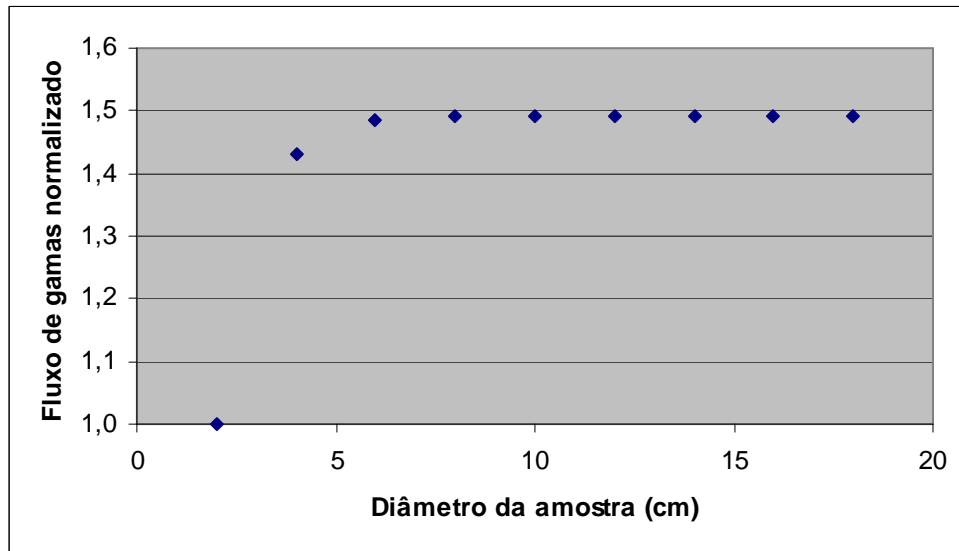


Figura 16: Relação entre o fluxo de gamas e o diâmetro da amostra de solo.

Este resultado é importante na preparação das amostras. O valor de 6,0 cm não é tão pequeno e nem tão grande para inviabilizar a construção das amostras de solos.

- **Altura**

A altura da amostra variou-se de forma a aumentar simultaneamente as extremidades superior e inferior, mantendo a fonte na origem do sistema. Ao variar a altura, observou-se que à medida que este parâmetro aumenta, o fluxo de fótons permanece constante. Isto ocorre porque não há um número suficiente de fontes secundárias localizadas acima e abaixo do detector cujas radiações podem atingi-lo. Optou-se pela altura de 10 cm, para que seja possível fazer um orifício na amostra experimental de solo para a introdução da sonda nuclear. A Figura 17 ilustra esta relação.

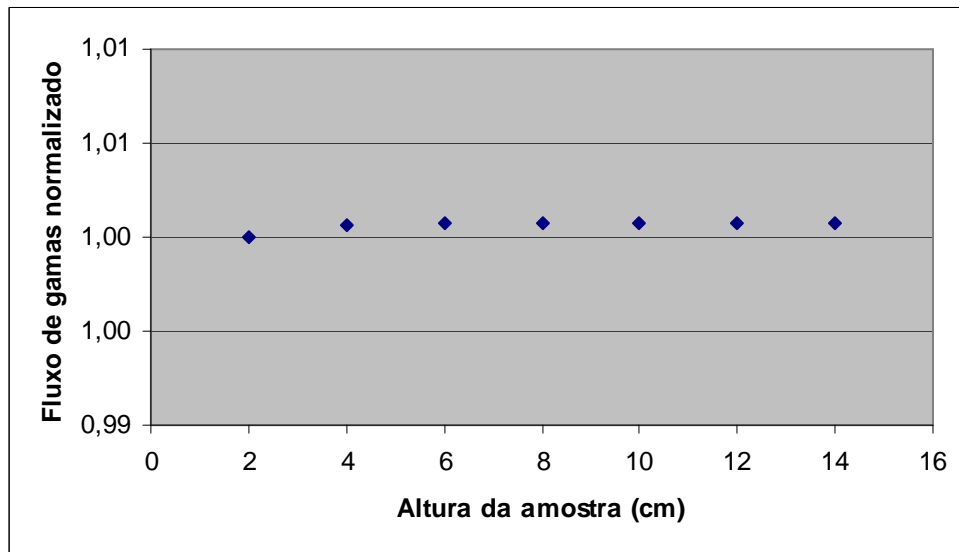


Figura 17: Relação entre o fluxo de gamas e a altura da amostra de solo.

3.1.5 Geometria do sistema

A Tabela 7 apresenta os valores de altura e diâmetro obtidos através das simulações pelo código MCNP 4C que representam a geometria mais eficiente para a medida da umidade de solo. Estes parâmetros foram utilizados como valores limite para a confecção do arranjo experimental.

Tabela 7
Parâmetros da geometria otimizada.

Elemento do sistema	Diametro (cm)	Altura (cm)
Detector	0,7	3,8
Blindagem de chumbo	0,7	0,5
Amostra de solo	6,0	10,0
Distância fonte-detector	0,5 cm	

3.2 Influência dos principais elementos presentes no solo

O objetivo do estudo da sensibilidade dos elementos constituintes do solo foi verificar a relação entre o aumento da umidade e da fração dos principais elementos presentes no solo (Al, Fe, Mg e Si), e o fluxo de gamas contabilizado pelo detector. A Figura 18 mostra o resultado desta simulação. Novamente, as medidas foram normalizadas em relação ao solo seco.

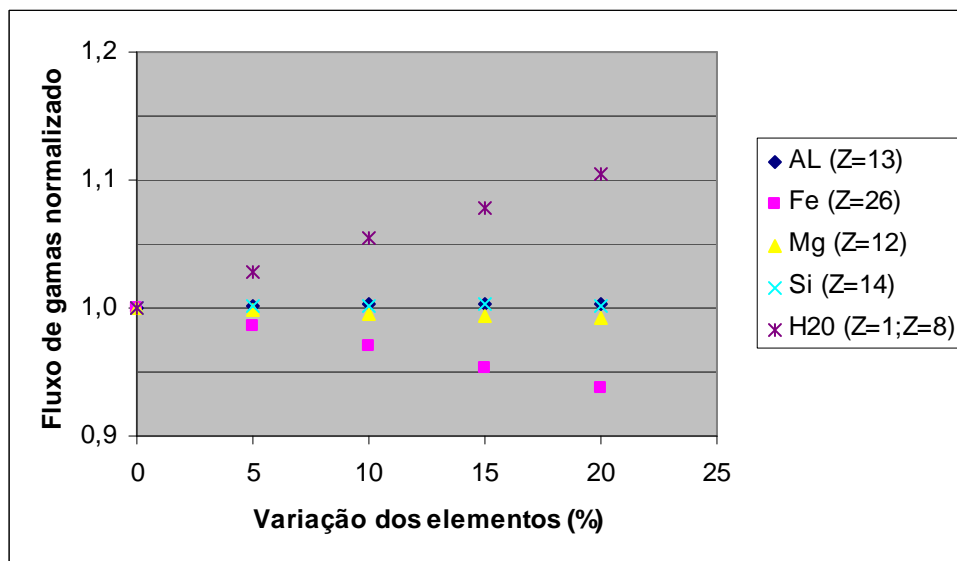


Figura 18: Relação entre o fluxo de gamas e a variação da porcentagem dos elementos ferro, alumínio, magnésio e silício na amostra de solo.

O gráfico acima mostra que a sessão de choque para o efeito Compton é maior para os elementos de baixo número atômico, uma vez que o aumento da contagem dos fótons obtida para a água foi significativo, enquanto que para os outros elementos não observou-se nenhum aumento do fluxo de fótons. Além disso, para o elemento ferro, o fluxo diminuiu devido principalmente ao aumento da ocorrência do Efeito Fotoelétrico, diminuindo assim a quantidade de fontes secundárias. Os valores obtidos do fluxo de gamas para estes elementos foram bem próximos ao obtido com o solo seco. Esta relação também confirma que a sonda nuclear é sensível para o aumento de água no solo, resultado positivo para viabilizar a sonda nuclear.

3.3 Curva de calibração

3.3.1 Análise teórica

As simulações realizadas para obtenção da umidade em função do fluxo de fótons dos dois tipos de solos estudados apresentaram os resultados ilustrados nas figuras 19 e 20. As contagens e o fluxo de fótons foram normalizados pelas contagens para o solo seco.

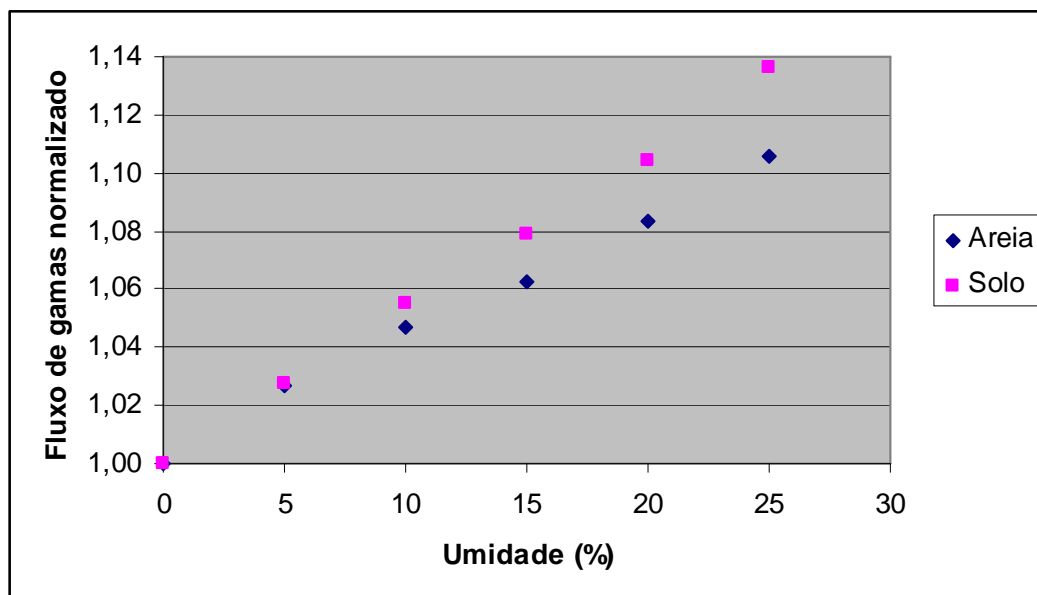


Figura 19: Relação teórica entre umidade e fluxo de fótons espalhados, para a areia e para o solo.

Pode-se observar na figura 19 que a relação entre a umidade do solo e a contagem de fótons espalhados é linear, tanto para o solo quanto para a areia. Além de ser linear, observa-se também através desta relação que o detector é sensível ao aumento de água na amostra, confirmando os resultados da Figura 18.

3.3.2 Análise experimental

Foram realizadas dez medidas para cada valor de umidade e a duração de cada medida foi de trezentos segundos. A curva de calibração foi obtida através da normalização do fluxo de fótons para uma dada umidade em relação ao fluxo de fótons do solo seco.

As medidas realizadas para obtenção da umidade *versus* contagens das amostras apresentaram o resultado ilustrado na figura 20. A normalização da curva de calibração umidade *versus* contagem para foi feita para ser comparada com a relação teórica obtida através do MCNP.

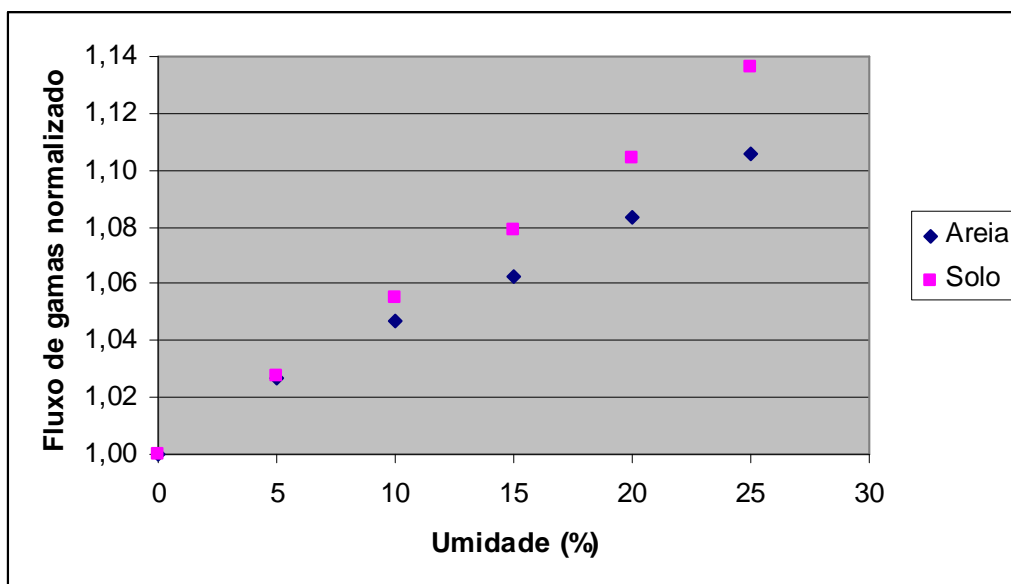


Figura 20: Relação experimental entre umidade e fluxo de fótons espalhados, para a areia e para o solo.

Pode-se observar na figura 20 que a relação entre a umidade do solo e a contagem de fótons espalhados é linear, tanto para o solo quanto para a areia. Além de ser linear, observa-se novamente que o detector é sensível ao aumento de água na amostra experimental.

Para realizar a comparação entre a curva teórica e a experimental, foi realizada a regressão linear das contagens normalizadas para os dois tipos de solo e os coeficientes de correlação apresentaram uma boa linearidade na relação umidade *versus* contagens. As figuras 21 e 22 mostram as curvas de regressão linear para o solo e para a areia, respectivamente.

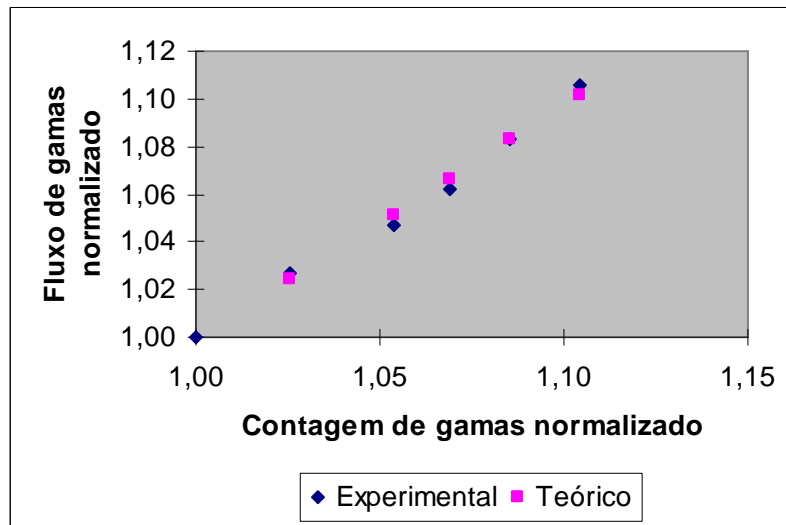


Figura 21: Curva da regressão linear para o fluxo de fótons(teórico) e contagens (experimental) normalizados, utilizando solo.

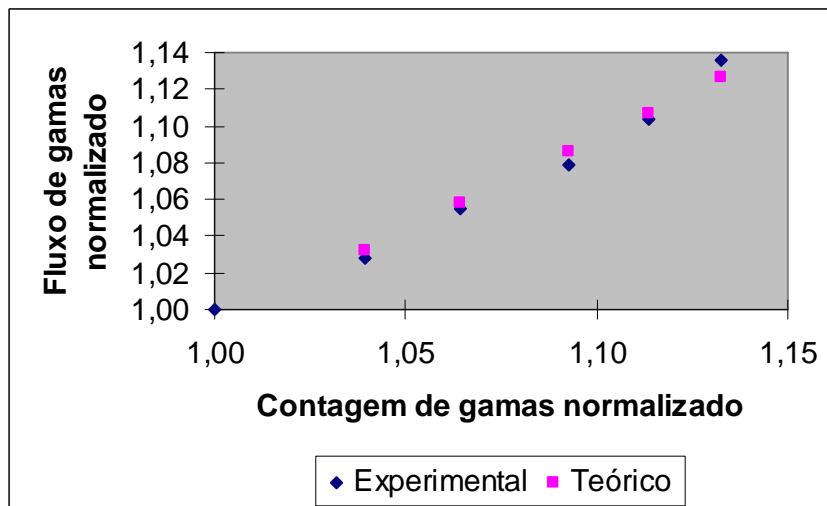


Figura 23: Curva da regressão linear para o fluxo de fótons(teórico) e contagens (experimental) normalizados, utilizando areia.

Para o solo, o coeficiente de correlação foi de 0,98, enquanto o da areia foi de 0,99. Dessa forma, foi possível se obter uma curva de calibração para a umidade de cada tipo de solo.

A curva de regressão linear para o solo é a descrita pela equação abaixo:

$$y = (1,00 \pm 0,07)x - (0,01 \pm 0,07)$$

onde y é a umidade percentual e x é o número de contagens obtidas.

De forma semelhante, a curva para a areia, é a descrita pela equação abaixo:

$$y = (0,99 \pm 0,05)x + (0,01 \pm 0,05)$$

As curvas de calibração do solo e da areia estão ilustrados nas Figuras 24 e 25. A contagem dos fótons não foram normalizados.

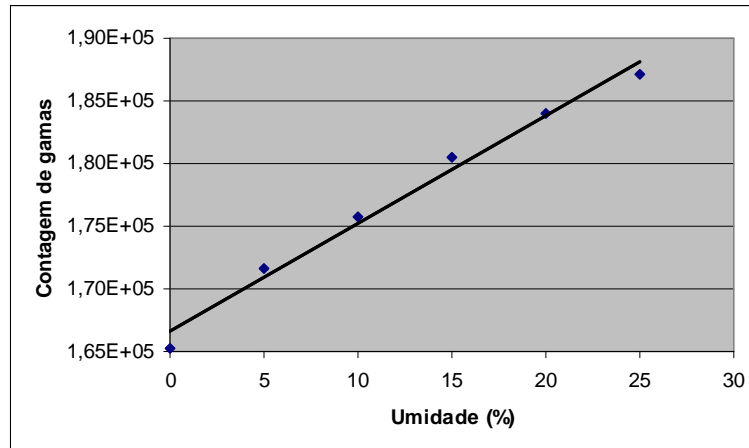


Figura 24: Curva de calibração, utilizando solo.

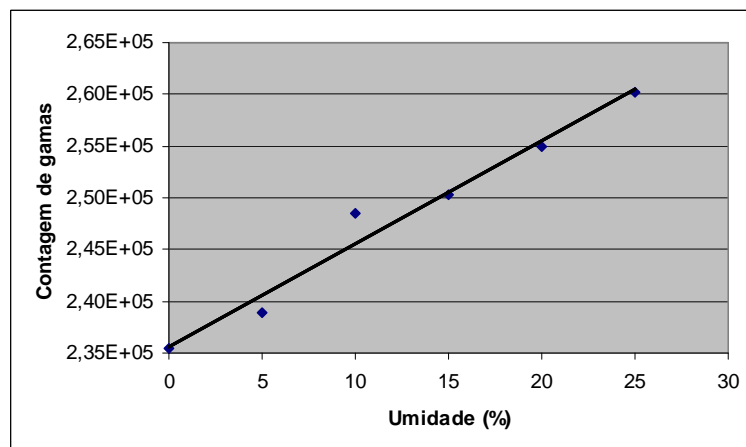


Figura 25: Curva de calibração, utilizando areia.

A curva de calibração para o solo é a descrita pela equação abaixo:

$$y = 863,41x + 166571$$

De forma semelhante, a curva para a areia, é a descrita pela equação abaixo:

$$y = 992,11x + 235640$$

As curvas umidade *versus* contagens de fótons espalhados obtidas para o solo e para areia são similares, o que sugere que para qualquer tipo de solo, a sonda nuclear deve apresentar a mesma curva de calibração. Dessa forma, a sonda nuclear, quando em plena operação, deverá ter estas equações disponíveis, para que a medida da umidade de uma amostra de solo qualquer, desde que previamente calibrado, possa ser realizada.

4. CONCLUSÕES

A medida da umidade de solo através do Efeito Compton utilizando uma sonda nuclear portátil é uma técnica viável que permite a determinação do conteúdo de qualquer tipo de solo. Estudos utilizando o código MCNP mostram que o fluxo de fótons que atinge o cintilador cresce linearmente com o aumento da umidade, bem como os experimentais.

Além disso, esta técnica é sensível para a água devido ao baixo número atômico do hidrogênio e oxigênio e não é sensível para elementos com número atômico alto, devido ao aumento da ocorrência do efeito fotoelétrico, entre outros. Ou seja, o fluxo da radiação espalhada não muda quando a concentração dos principais elementos do solo aumenta, uma vez que a ocorrência do efeito fotoelétrico de radiações de baixa energia depende do número atômico dos elementos. Isto pode ser explicado devido a uma compensação entre a produção dos fótons secundários e os primários de 60 keV e atenuação dos fótons espalhados antes de atingirem o cintilador.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Sondas nucleares para serem utilizadas em campo para medida de umidade do solo podem ser construídas, facilitando este tipo de medida;
- Curvas de calibração para solos distintos podem ser obtidas, principalmente para os já utilizados na agricultura;
- Outras fontes com energias maiores podem ser utilizadas para estudar o balanço entre fótons espalhados e atenuados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTKORN, R., I. KOEV, R.P. VAN DUYN, M. LITORJA. “ *Low-loss liquid-core optical fiber for low-refractive-index liquids: fabrication, characterization, and application in Raman spectroscopy*”, Applied Optics, v36, n35, p.8992-8998, 1997.

ANDRADE, A. R. S., JADOSKI, S.O., GUERRA, H. C., GUERRINI, I. A., “*Influência do tempo de contagem na determinação da densidade de nêutrons*”, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v5, n3 p.411-415, 2001.

BORGES, E.N., NETO, F.L., CORREA, 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.

BRIESMEISTER, F., “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C,” LA-13709-M (April 2000).

COSTA, A.C., ALMEIDA, V.C., LENZI, E., NOZAKI, J., “ *Determinação de cobre, alumínio e ferro em solos derivados do basalto através de extrações sequenciais*”, Química Nova, v.25, n.4, p. 548-552, 2002.

DALMOLIN, R. S. D., GONÇALVES, C. N., KLAMT, E., DICK, D. P., “*Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral*”, Ciência Rural, Santa Maria, v.35, n.2, p.481-489, 2005.

DUFEK, J., “*Monte carlo neutronic calculations and programming*”, Royal Institute of Technology, Dep. Of Nuclear and Reactor Physics, 2004.

ESCOSTEGUY, P. A. V., HENKIN, D., CALDEIRA, M. H., PIMENTEL, J., ARNS, A. P., “*Resíduos culturais e resultado de análise de solo coletado com diferentes amostradores no sistema de plantio direto*”, Ciência Rural, Santa Maria, v.35, n.1, p.69-75, 2005.

HOFFMAN, D. C., DROPECKY, B. J., “*Electron-Capture Decay of Pu²³⁷*”, Phys. Rev. Vol 30, p 286, 1958.

KNOLL, G., “Radiation detection and measurement”, second edition, 1989.

LIBARDI, P., “Dinâmica da água no solo”, 1ª ed., Piracicaba: o autor, 1995.

MAZZILLI, B.P., FILHO, C. R. R., KODAMA, Y., SUZUKI, F.F., DELLAMANO, J. C., MARUMO, J. T., SANCHES, M. P., VICENTE, R., BELLINTANI, S. A., “*Noções básicas de proteção radiológica*”, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, p.31, 2002.

MIRANDA, J., COSTA, L.M., RUIZ, H. A., EINLOFT, R., “*Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água*”, Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol,30, p.633-647, 2006.

MOREIRA, A. C., CAVALCANTE, F. H. M., FILHO, O. P., COIMBRA, M. M., APPOLONI, C. R., “*Determinação da condutividade hidráulica em coluna de solo indeformado por transmissão de raios gama*”, Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Física, 2000.

RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S., CORRÊA, G.. “*Pedologia – Base para distinção de ambientes*” – 4ª ed. – Viçosa: NEPUT, 2002

SENA, M. M., POPPI, R. J., FRIGHETTO, R. T. S., VALARINI, P. J., “*Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos*”, Química Nova, 23(4), 2000.

SILVA, F. D., COUCEIRO, P. R., C., FABRIS, D., GOULART, A. T., KER, J. C., “*Magnesioferrita e caminho pedogenético de transformação de óxidos de ferro magnéticos em dois perfis de solo derivados de tufito da região do Alto Paranaíba*”, Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29,p.763-775, 2005.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., PRINZIO, R. DI., PRINZIO, M. A. R. R. Di., “*Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*”, IRD/CNEN, p.72-77, 2003.

TEIXEIRA, C. F. A., MORAES, S. O., SIMONETE, M.A., “*Desempenho do tensiômetro, TRD e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo*”, Revista Brás. Ci. Solo, 29:161-168, 2005.

TEIXEIRA, A. S., COELHO, S. L., “*Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática*”, Eng. Agric., Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, 2005.

TOMMASELLI, J. T. G., BACCHI, O. O. S., “*Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos*”, Pesq. Agropec. Brás., Brasília, v.36, n.9,p.1145-1154, 2001.

APÊNDICE – Elaboração da geometria no MCNP

A geometria do sistema é construída no MCNP 4C definindo-se volumes específicos, os quais são obtidos através de interseção e união de regiões limitadas por superfícies, também definidas pelo usuário. Cada volume pode ser preenchido com qualquer material ou pelo vácuo. Dessa forma, a entrada de dados deve conter informações a respeito da geometria do sistema, dos materiais constituintes, das sessões de choque nas livrarias disponíveis, da localização e das características da fonte radioativa, bem como do tipo de respostas desejadas.

Pode-se observar na Figura A.1 que a geometria modelada é constituída por volumes distintos. Cada volume representa um elemento específico do sistema, o qual é preenchido pelo material correspondente.



Figura A.2: Ilustração da geometria modelada através do código MCNP.

O arquivo de entrada de dados do MCNP se apresenta da seguinte forma:

Volumes

<espaço em branco>

Superfícies

<espaço em branco>

Materiais

Especificações

Cada linha do arquivo deve conter, no máximo, 80 caracteres. Existem alguns caracteres especiais que são usados no MCNP, listados a seguir:

- “c”: quando posicionado nas colunas de 1 a 5 representa uma linha de comentário, a qual não será considerado pelo MCNP 4C.
- “\$”: quando posicionado após a introdução dos dados, permite que um comentário seja introduzido, sem que seja lido pelo MCNP 4C.
- “&”: significa que as informações contidas na linha seguinte pertencem à linha anterior.

Para facilitar a elaboração da geometria, é necessário definir, primeiramente, as superfícies. Em seguida, definem-se os materiais constituintes do sistema. Os volumes são definidos após a definição das superfícies e dos materiais e por último, as especificações são introduzidas. A seguir, as formas de se definir cada parte do arquivo de entrada, serão explicadas detalhadamente.

Superfícies

As superfícies são definidas no sistema cartesiano, utilizando-se assim as coordenadas x, y e z. O sistema de coordenadas no MCNP é arbitrário e pode ser definido pelo usuário, porem, o mais utilizado é o plano de coordenadas cartesianas, cuja orientação está ilustrada na Figura B1.

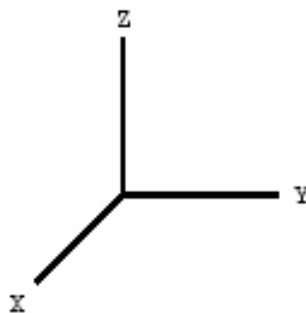


Figura A.2: Orientação do sistema de coordenadas cartesianas usado no MCNP

Estas superfícies são definidas introduzindo-se coeficientes às equações analíticas de superfícies, ou através de tipos específicos de superfícies, cujos pontos são conhecidos (TABELA A.1).

Cada linha do arquivo de entrada referente a cada superfície, tem a seguinte estrutura:

j a lista

Onde: **j** é um numero arbitrário que dá referência à superfície;

a representa o símbolo referente a geometria requerida;

lista introduz os coeficientes requeridos para definir o tipo de superfície.

Cada superfície definida divide o espaço em duas partes. No MCNP, uma parte tem o sentido positivo em relação à superfície enquanto a segunda parte tem o sentido negativo.

Para planos perpendiculares a algum eixo, o sentido positivo da face coincide com o sentido positivo do eixo e o sentido negativo da face coincide com o sentido negativo do eixo. Assim, a região do espaço é definida por um número que acompanha um sinal correspondente a superfície ao redor da região. O sinal negativo refere-se à região do espaço com um sentido negativo em relação à superfície e o sinal positivo, facultativo, refere-se ao espaço com o sentido positivo em relação à superfície.

Se a superfície for curva, como um cilindro ou uma esfera, a parte interna tem o sentido negativo em relação à superfície e será representado por um sinal negativo seguido do número que especifica a superfície, e o espaço ao redor, positivo em relação a superfície, ser representado por um sinal positivo seguido do numero.

As linhas do arquivo de entrada que definem as superfícies utilizadas para a modelagem da blindagem de chumbo na geometria estudada (partes superior e inferior) são representadas por:

6 pz 0.7

10 pz 0.5

Onde: **6** indica que esta foi a 6ª superfície a ser definida;

pz é o símbolo que define um plano paralelo ao eixo z.

0.7 é o coeficiente que define a distância do plano à origem.

10 indica que esta foi a 10ª superfície a ser definida;

pz é o símbolo que define um plano paralelo ao eixo z (parte superior)

0.5 é o coeficiente que define a distância do plano à origem (positivo).

TABELA A.1

Dados para definição das superfícies no MCNP

Símbolo	Superfície	Características	Equações	Coefficientes
P	Plano	Geral	$Ax + By + Cz - D = 0$	ABCD
PX		Normal ao eixo X	$x - D = 0$	D
PY		Normal ao eixo Y	$y - D = 0$	D
PZ		Normal ao eixo Z	$z - D = 0$	D
SO	Esfera	Geral	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S	localizada na	Centrada no eixo X	$(x - x)^2 + (y - y)^2 + (z - z)^2 - R^2 = 0$	x y z R
SX	origem	Centrada no eixo Y	$(x - x)^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	x
SY		Centrada no eixo Z	$x^2 + (y - y)^2 + z^2 - R^2 = 0$	y R
SZ			$y^2 + y^2 + (z - z)^2 - R^2 = 0$	z R
C/X	Cilindro	Paralelo ao eixo X	$(y - y)^2 + (z - z)^2 - R^2 = 0$	y z R
C/Y		Paralelo ao eixo Y	$(x - x)^2 + (z - z)^2 - R^2 = 0$	x z R
C/Z		Paralelo ao eixo Z	$(x - x)^2 + (y - y)^2 - R^2 = 0$	x y R
CX		No eixo X	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		No eixo Y	$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		No eixo Z	$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R

Materiais

Os materiais constituintes do sistema são definidos através da linha do arquivo de entrada que apresenta a seguinte estrutura:

mn ZZZAAA fração

Onde: **mn** numera o volume definido (n = 1,2,3...)

ZZZ especifica o número atômico do elemento (com até três caracteres)

AAA especifica o número de massa do elemento (com até três caracteres)

fração indica a proporção deste elemento no material.

É importante observar que os elementos constituintes de cada material podem ser normalizados a 1 ou não. Por exemplo, se o material for H₂O, as frações podem ser tanto 0.667

e 0.333, como 2 e 1 para H e O respectivamente. Se as frações estiverem acompanhadas de sinal negativo, então elas são frações do peso. Por outro lado, se elas estiverem acompanhadas pelo sinal positivo, então elas são frações atômicas. As duas frações são podem ser misturadas em uma mesma entrada.

Assim, a linha do arquivo de entrada que define o material constituinte da blindagem utilizada na sonda nuclear é representada por:

m3 82000. 1.0

Onde: **m3** é o 3º volume definido pelo usuário (n = 1,2,3...)

82000. é o número atômico do elemento chumbo

AAA é o número de massa do elemento chumbo

1.0 é a proporção do chumbo no material.

Volumes

A geometria a ser modelada é constituída por diferentes objetos geométricos que são volumes bem definidos. Os volumes são definidos através de interseção ou união entre as superfícies já definidas. Cada volume pode ser preenchido com materiais distintos. Cada linha do arquivo de entrada que especifica os volumes apresenta a seguinte estrutura básica:

j m d combinações

Onde: **j** é um número arbitrário que denomina o volume ($1 \leq j \leq 99999$)

m é o número referente ao material especificado

d é a densidade do material correspondente: sem entrada para o vácuo
entrada positiva = 10^{24} átomos/cm³
entrada negativa = g/c
entrada negativa = g/cm³

combinações as superfícies são combinadas através de operadores Booleanos.

Operadores Booleanos:

- **interseção:** interpretado por uma ausência de símbolos, ou seja, um espaço em branco);
- **união:** representado por “ : “ (dois pontos);
- **complemento** (ou subtração): representada por “ # “ .

Os parênteses podem ser usados para determinar a ordem das operações. Os parênteses e os símbolos dos operadores também funcionam como delimitadores. Onde eles estão presentes, os espaços em branco não são necessários. A ordem padrão das operações é a seguinte: complemento primeiro, interseção em segundo e união em último lugar.

Por exemplo, a linha do arquivo de entrada que define o material constituinte da blindagem utilizada na sonda nuclear é representada por:

2 3 -11.36 -1 10 -6

Onde: **2** indica que este foi o 2º volume a ser definido.

3 é o número referente ao material especificado (chumbo)

-11.36 é a densidade do chumbo

-1 10 -6 combinações das superfícies através dos operadores Booleanos

Especificações

A entrada dos dados referentes às especificações do problema pode ser dividida nos seguintes itens:

- Tipo de transporte:
 - **mode n** especifica transporte de nêutrons
 - **mode np** especifica transporte de nêutrons e fótons
 - **mode p** especifica transporte de fóton
 - **mode e** especifica transporte de elétrons
- Especificações da fonte:
 - **Sdef** define fonte pontual
- Especificações de saída:
 - especifica o tipo de informação que o usuário deseja obter a partir dos cálculos de Monte Carlo (TABELA A.2)

- Especificações dos materiais e sessões de choque:
 - especifica a composição isotópica dos materiais
- “cut-offs” :
 - define o número inicial de partículas

TABELA A.2
Especificações de saída no MCNP 4C

Representação					Descrição
F1:N	ou	F1:P	ou	F1:E	Corrente de superfície
F2:N	ou	F2:P	ou	F2:E	Fluxo de superfície
F4:N	ou	F4:P	ou	F4:E	Fluxo em um volume
F5a:N	ou	F5a:P			Fluxo em um ponto ou em um detector circular
F6:N	ou	F6:P	ou	F6:N,P	Deposição de energia
F7:N	ou	F7:P	ou	F7:E	Deposição de energia produzida na fissão
F8:N	ou	F8:P	ou	F8:P,E	Altura do pulso

Assim, a entrada dos dados referentes às especificações do problema para as simulações realizadas é representada por:

mode P

sdef erg= 0.06 pos= 0 0 0 par=2

e0 0.04 0.06

f04:p 1

nps 100000

Onde: **mode P** especifica transporte de fótons

sdef erg= 0.06 pos= 0 0 0 par=2 fonte pontual de energia 60keV localizada na origem do sistema de coordenadas

e0 0.04 0.06 intervalos de energias compreendidas entre 0 e 60 keV

f04:p 1 indica o fluxo de superfície no volume 1

nps 100000 representa o número inicial de partículas

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](#)