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

Sonda nuclear para medida da densidade da madeira por espalhamento Compton

Aluno: Rodrigo Penna
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 densidade da madeira 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 - UFMG

Rodrigo Penna

Belo Horizonte – MG

Agosto – 2006

Este trabalho é dedicado à minha esposa, Ariane, e minha filha, Laurinha, que o acompanharam cada instante em sua gestação.

AGRADECIMENTOS

Imprescindível, ao término deste trabalho, fazer as referências e agradecimentos a tantos que ajudaram, acompanharam, sugeriram e colaboraram para sua realização das mais diversas formas, e todas importantes. Faço questão de agradecer a todos!

Primeiramente, ao meu professor, amigo e orientador, Clemente José Gusmão Carneiro da Silva, posso dizer, por tudo, pelo trabalho que ora apresento.

Agradeço imenso a toda ajuda de todo o nosso grupo de pesquisa: ao Marinho, ao Paulo, ao Márcio e ao Gustavo, todos ajudaram, das mais diversas maneiras.

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.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), pela disponibilização da oficina mecânica e prestação de serviços para realização de experimentos, sempre com extrema atenção e boa vontade. Particularmente, aos senhores José Gomes e Fernando, da oficina.

Ao senhor Anderson, da oficina mecânica do Departamento de Química da UFMG, por tantos serviços, ajudas e atenções dispensadas. Sem contar as várias sugestões que pouparam tempo e esforços, meu muito obrigado!

Ao professor Silvestre, amigo e companheiro de trabalho, pela doação das madeiras para a pesquisa e também pelo passeio e prosa agradáveis no seu sítio.

A empresa Vallourec & Mannesmann Tubes, na pessoa do senhor Túlio Jardim Raad, que me recebeu muito gentilmente com sua equipe na fazenda da V&M Florestal em Paraopeba/MG, e forneceu muitas amostras de madeira para a realização dos experimentos. Agradecemos ao apoio.

Ao professor Arno Heeren, pelo acolhimento nos momentos de lazer e descontração em sua casa, sempre muito agradáveis.

Ao professor Tarcísio Passos Ribeiro de Campos, pela coragem das decisões difíceis, mas que nos fazem tomar um bom rumo, na vida.

Agradeço a toda família da minha esposa, ao Dedé e à Rosália, que me serviram vários churrascos em sua casa e me deixaram à vontade e tranqüilo, mesmo nos momentos mais estranhos, quando todos faziam festa e eu insistia em ficar escrevendo no computador.

Agradeço ao meu pai e à minha avó, por estar aqui. E por tudo!

E agradeço em especial a Ariane, esposa e amiga, que se desdobrou em mil e suportou minhas ausências quando enfurnado no computador, a todas as horas do dia e da noite, enquanto carregava na barriga minha filha Laurinha, junto com ela minhas maiores inspirações, neste trabalho e em tudo na minha vida!

E, quase me esqueci, agradeço ao meu cachorro, Ajax, pela companhia de todas as horas, pelas madrugadas frias afora, a todo instante do meu lado no computador, trazendo muita alegria!

SUMÁRIO

SUMÁRIO VI
LISTA DE FIGURAS VII
LISTA DE TABELAS IX
RESUMO X
ABSTRACT XI
INTRODUÇÃO XII
I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
I-1 Medida da densidade da madeira 1
I-2 Fundamentos Teóricos 3
I-3 Efeito Rayleigh ou Compton Coerente 6
I-4 Guia Líquido 8
II. MATERIAL E MÉTODOS 11
II-1 Fonte utilizada no densímetro nuclear 11
II-2 Relação entre a densidade e fluxo de gamas 14
II-3 O arranjo experimental 14
II-4 Preparação das amostras de madeira 15
II-5 Medida com fonte e cintilador externos 17
II-6 Medida com a sonda introduzida na madeira e guia líquido 18
II-7 Detectores de Cintilação 21
II-8 Detector Cintilador Plástico NE-102 22
II-9 Preparação do Cintilador Plástico 22
II-10 Guia Líquido de Luz 26
II-11 Simulações e programação do MCNP - 4C 27
II-11.1 Estudo da blindagem adequada ao Amerício-241 28
II-11.2 Estudo da posição ideal da fonte 29
II-11.3 Influência da geometria da amostra de madeira 31
II-11.4 Simulação de um densímetro com Amerício-241 para diferentes geometrias 31
III. RESULTADOS 33
III-1 Medida da densidade da madeira pela razão massa/volume 33
III-2 Medida da densidade com detector e fonte externos 34
III-3 Medida da densidade com fonte interna e guia líquido 37
III-4 Comparação entre os dois densímetros 39
III-5 Simulações com o MCNP - 4C 40
III-6 Espectros 44
IV. CONCLUSÕES 48
V. PERSPECTIVAS 49
VI. LITERATURA CONSULTADA 50
APÊNDICE: PROGRAMAÇÃO DO MCNP-4C 53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Representação esquemática do Espalhamento Compton (Tauhata *et al.*, 2003)..... 4
Figura 2. Variação do ângulo de espalhamento Compton em função da energia do fóton incidente, plotado em coordenadas polares (Knoll, 1989). 6
Figura 3. Representação do Efeito Rayleigh (Bushberg *et al.*, 2002). 7
Figura 4. Contribuição dos diversos efeitos produzidos pela interação da radiação num material para o coeficiente de atenuação linear total (Tauhata *et al.*, 2003). 8
Figura 5. Principais modos de decaimento do Amerício-241. 11
Figura 6. Esquema da fonte de Américo-241 utilizada (catálogo Amersham)..... 12
Figura 7. Representação gráfica da fonte secundária de fótons espalhados (Silva, 2004)... 13
Figura 8. Cubos de madeira de 2 cm de aresta. 16
Figura 9. Orifícios para introdução da sonda do densímetro..... 17
Figura 10. Esquema do arranjo para medida de densidade com fonte e cintilador externos. 18
Figura 11. Montagem da sonda para introdução na madeira, sem a fonte. 19
Figura 12. Esquema para medida da densidade com sonda introduzida na madeira..... 20
Figura 13. Esquerda - cintilador orgânico inteiro e um cortado ao meio, para ser usinado e polido antes de sua utilização; direita - cintiladores orgânicos utilizados no experimento. 23
Figura 14. Método utilizado para lixar e dar polimento vertical nos cintiladores orgânicos usinados. 23
Figura 15. Diferença de peças polidas e não polidas..... 24
Figura 16. Transparência e brilho adquiridos pelos cintiladores após tratamento adequado. O cintilador da foto à esquerda não foi tratado com Kaol..... 25
Figura 17. Esquerda - detalhe da ponta de um guia-liquido; direita - um guia-liquido de 3 metros de comprimento. 26
Figura 18. Funcionamento do guia líquido..... 27
Figura 19. Esquema do estudo da blindagem necessária..... 29
Figura 20. Visualização da influência da distância entre a fonte e a blindagem no densímetro. 30
Figura 21. Gráfico da densidade *versus* contagens. 35
Figura 22.Gráfico da regressão excluindo a sucupira..... 36
Figura 23. Gráfico da regressão para as medidas com a sonda e fonte dentro da madeira. . 38
Figura 24. Medida da densidade ($g.cm^{-3}$) com fonte externa *versus* medida com fonte interna. 39
Figura 25. Resposta do MCNP-4C para variação do fluxo de fótons em função da espessura da blindagem de chumbo. 40
Figura 26. Resposta do MCNP-4C para variação do fluxo de fótons em função da distância entre a fonte de Amerício-241 e a blindagem de chumbo. 41
Figura 27. Variações no fluxo de fótons simulado pelo Monte Carlo em função da variação no raio da amostra de madeira. 42

Figura 28. Gráfico da densidade *versus* fluxo de fótons previsto pelo MCNP-4C para o densímetro com fonte e detector externos. 43
Figura 29. Gráfico da densidade *versus* fluxo de fótons para um densímetro nuclear de Amerício-241 com sonda introduzida na madeira a 1,5cm da borda. 44
Figura 30. Espectros do Amerício-241 após espalhamento Compton na madeira, para o sistema com fonte externa e interna. 45
Figura 31. Espectros do Amerício-241 com cintilador plástico NE-102 sem revestimento (A), revestido com alumínio (B), com óxido de magnésio em pó (C) e com teflon (D) (Silva, 2005). 46
Figura 32. Espectro do ^{241}Am obtido com detector de Si(Li) de 30 mm^2 x 3 mm (Knoll, 1989). 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade das madeiras obtidas pela relação massa(g) / volume(cm^3). 33
Tabela 2. Média das contagens nos bloquinhos de madeira sem o background. 34
Tabela 3. Média das contagens obtidas nas madeiras para sonda interna. 37

RESUMO

Foram construídos dois sistemas para a medida da densidade da madeira baseado no espalhamento Compton. Os densímetros utilizaram fontes de ^{241}Am, com energia gama de 60 keV.

No primeiro a radiação espalhada foi medida por um cristal cintilador de NaI(Tl) e foi obtida uma curva de calibração a partir de amostras de madeira com densidades conhecidas que permite a determinação da densidade de uma amostra de madeira desconhecida.

O outro sistema é constituído de uma sonda, com fonte de Amerício-241 e um cristal cintilador plástico NE-102. Neste sistema, uma blindagem de chumbo evita que a radiação direta atinja o cristal cintilador e somente a radiação que interage com a madeira e é espalhada por efeito Compton é detectada. Os fótons produzidos no cintilador seguem através de um guia de luz líquido até o tubo fotomultiplicador e o sistema eletrônico onde são processados. Neste sistema também foi obtida uma curva de calibração que permitiu a medida da densidade de uma amostra de madeira, tendo o resultado sido coerente com método de medida tradicional, por imersão.

Toda a simulação e otimização do sistema foram feitas através do código Monte Carlo. Com o uso desta ferramenta, foi possível otimizar a blindagem entre a fonte e o cristal cintilador, a distância ideal entre fonte e blindagem, o tamanho da amostra de madeira necessária e a própria possibilidade do uso deste sistema para a medida da densidade da madeira.

Os dois sistemas apresentam inovações em relação a outras técnicas nucleares para medidas de densidade, pois estas são baseadas na atenuação, e não no espalhamento. Eles se mostraram eficientes para a determinação da densidade para a faixa da madeira, de 0,4 a 1,4 $g.cm^{-3}$.

ABSTRACT

Nuclear Probe for measure of wood density by Compton Scattering

Two systems, based on Compton Scattering, for wood density measurements were constructed. In the first system a gamma ray beam from an Am241 source reaches small wood blocks then a scattered radiation is measured. Several wood blocks with different wood densities were used.

The second system is also based on Compton Scattering. Several wood samples from different tree species were obtain cutting 50 cm of wood trunk. An axial hole of 1.8 cm of diameter and 12 cm depth were open in each wood sample for placing a nuclear detector system. This system consists of a source of Am241, a lead shield and plastic scintillator connected to a liquid guide light of 3 meters length. Source, lead, and scintillator were covered with a thermoretractil plastic and placed inside of an aluminum tube forming the detector system. The guide conveys the light pulses to a photocathode of a photomultiplier tube. These electronics pulses are sent to acquisition data system to be counted and stored.

Optimization of the systems was made through the Monte Carlo code. Using this tool, it was possible to improve geometric parameter, such as the distance between the Am241 source and the lead shield.

Both systems shown to be adequate for wood density measurements. Calibration curves, density versus counts, showed correlation coefficients near of the unity.

INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas nucleares tem se mostrado um avanço tecnológico útil em vários ramos da indústria. Tais técnicas são eficazes na solução de uma série de problemas para os quais outros aparatos não apresentam a mesma eficiência. Particularmente, podemos citar as medidas de densidade, umidade, espessura e nível, aplicáveis à indústria siderúrgica e petroquímica, por exemplo. E estão disponíveis no mercado dispositivos que incorporam esta tecnologia, a maioria importados.

O Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares (PCTN) tem investido na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de medida de densidade através de técnicas nucleares (Silva, 2004). Já foi desenvolvido um densímetro para aplicação em materiais porosos que comprovou sua eficiência e funcionalidade. E estas pesquisas abriram espaço para aplicações em circunstâncias específicas de interesse da indústria.

Dados levantados no Ministério da Ciência e Tecnologia mostram a relevância da indústria da madeira no Brasil. Particularmente, o país se destaca na produção e exportação de madeira, infelizmente nem sempre legalizada. Originário da Austrália e outras ilhas da Oceania, o eucalipto foi trazido para Brasil na segunda metade do século XIX com o objetivo de ajudar na produção de dormentes para as linhas férreas que se instalavam no país (MCT, 2005b). Hoje, temos a maior área plantada de eucaliptos do mundo, mais de 3 milhões de hectares (MCT, 2005c), somos o maior produtor mundial da celulose (cerca de 6,3 milhões de toneladas por ano) e alcançamos o maior índice médio de produtividade (40 m^3 por hectare ao ano) (MCT, 2005a).

O eucalipto brasileiro se destina basicamente à produção de celulose e papel e ao carvão que abastece as siderúrgicas. As indústrias brasileiras que usam o eucalipto como matéria prima para a produção de papel, celulose e demais derivados representam 4% do nosso PIB, 8% das exportações e geram aproximadamente 150 mil empregos (MCT, 2005b). Por enquanto, apenas 14% de toda a madeira consumida no mundo são provenientes de plantios florestais (MCT, 2005b).

As medidas de densidade da madeira baseadas na transmissão, ou seja, maior ou menor absorção da radiação em função da variação de sua densidade são extremamente dependentes da geometria. Portanto, as técnicas baseadas neste princípio pressupõem sua aplicação a peças de espessura precisamente controlada. Embora tal princípio se aplique, na indústria, em situações específicas, é ineficiente para o trabalho de campo. Uma técnica fundamentada no espalhamento Compton é tão eficiente em termos de precisão com relação à anterior como incorpora a vantagem de praticamente eliminar esta limitação.

A madeira é composta basicamente de átomos de baixa densidade. Ao contrário de trabalhos anteriores (Silva, 2004) quando se utilizou o Césio-137, cuja energia de emissão gama é de 662 keV e possui suas aplicações, neste caso o Amerício-241 será utilizado. Sua energia de emissão é de 60 keV, menos de 10% da Energia do Césio. Isto trás grande vantagem em termos de radioproteção, visto que as blindagens necessárias para as fontes de Amerício-241 são bem menores, mais leves e conseqüentemente mais portáteis. Vantagens fundamentais quando se pensa em um equipamento compacto.

A indústria mineira pode vir a demonstrar interesse por este tipo de equipamento. E, pela sua demanda, pode haver a necessidade de importá-lo. Os métodos tradicionais de medida de densidade da madeira se baseiam diretamente na relação $d = \frac{m}{V}$, onde d = densidade, m = massa e V = volume. Pequenas amostras de madeira são retiradas do lote a ser analisado, pesadas e seu volume medido pelo deslocamento de água quando imersas em um recipiente de vidro graduado. Embora eficiente, este método simples demanda a instalação de um laboratório e mão de obra qualificada e permanente quando o volume de amostras é grande, gerando um custo operacional para a empresa.

Visando a construção de um densímetro adequado a esta finalidade, medir com precisão, rapidez e versatilidade a densidade da madeira, foi aplicada neste trabalho a técnica de Monte Carlo (MCNP-4C). Através desta poderosa ferramenta, vários aspectos práticos da construção do densímetro podem ser analisados, otimizando seu funcionamento desde a sua montagem até a sua operação final. O objetivo deste trabalho é a montagem deste densímetro.

I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I-1 Medida da densidade da madeira

A densidade da madeira tem uma importância fundamental na qualidade dos produtos sólidos feitos desta mesma madeira, além dos produtos derivados da polpa e o próprio papel, derivado da celulose. A densidade é a mais importante característica da espécie, pois seu conhecimento prévio permite fazer uma série de previsões com respeito às futuras propriedades da madeira, suas futuras utilidades e as propriedades de seus produtos derivados (Zobel & Talbert, 1984; Bowyer & Smith, 1998).

Os termos densidade e peso específico são usados como sinônimos no estudo da madeira (Haygreen & Bowyer, 1996). Neste trabalho será usado somente o termo densidade. Dentre as várias características físico-químicas, a densidade é a mais importante propriedade física da madeira, e muitas outras propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas a ela (Haygreen & Bowyer, 1996).

Os métodos e equipamento para determinar a densidade de pequenas amostras de madeira são vários. Uma das medidas mais satisfatórias da densidade básica é a relação entre o peso seco da amostra na estufa dividido pelo volume da amostra da madeira verde (Zobel & Jett, 1985). O peso seco é obtido utilizando uma balança analítica. Já o volume pode ser obtido de várias maneiras. Para uma amostra de forma bem definida, o método mais simples é calcular o volume sendo conhecidas suas dimensões. Se a amostra for irregular na sua forma, o volume pode ser obtido pelo método do deslocamento da água. Um terceiro método envolve o uso de um cilindro graduado. Neste caso, o volume é a diferença entre o nível do fluido antes e depois da imersão da amostra de madeira cuja densidade se deseja medir (Haygreen & Bowyer, 1996).

As normas brasileiras também versam sobre a medida de densidade de madeira. A densidade básica deve ser tomada a partir da massa pesada de discos ou “cavacos” (pedaços) secos em estufa a (105 ± 2) ºC por unidade de volume de água deslocada quando

a mostra é submersa. No caso de discos, devem ser retirados da secção transversal do tronco. O critério para a madeira ser considerada seca é que após duas pesagens consecutivas a diferença eventualmente encontrada não pode ser superior a 0,5 g. A mesma norma dispões sobre as características dos equipamentos do ensaio e dos roteiros a serem utilizados durante as medidas (ABNT, 2003).

O emprego do método de determinação de densidade em madeiras por atenuação de radiação gama foi introduzido há quatro décadas (Loss, 1961), sendo pouco tempo depois desenvolvido no Brasil (Reichardt & Ferreira, 1966; Ferreira & Ferraz, 1969). Basicamente, até os dias de hoje, o método consiste em se fazer uma medida da atenuação de um feixe colimado de radiação X ou gama atravessando uma amostra de madeira. O cálculo da densidade é obtido através da conhecida equação da atenuação. É um processo difundido e bastante utilizado, porém apresentando como desvantagem uma grande influência da geometria. Fatores como a colimação do feixe e as dimensões das amostras produzem forte influência nas medições e, conseqüentemente, podem introduzir graves erros nas medidas.

Vários outros autores utilizaram o método de atenuação gama para medir a densidade de amostras de madeira (Ferraz, 1976; Cown & Clement, 1983; Zobel & Jett, 1985; Palermo *et al.*, 2003). Uma de suas vantagens é que se trata de um método não destrutivo. Várias diferentes espécies de madeiras têm suas características biológicas estudas através deste método (Winistorfer & Jr., 1994; Winistorfer & Moschler, 1996; Rezende *et al.*, 1999; Palermo *et al.*, 2003). Tais estudos possibilitam melhorias na produtividade das plantações, desenvolvimentos genéticos e outros avanços de interesse econômico relevante.

Mesmo transformada em carvão vegetal, o método da atenuação da radiação pode ser utilizado para determinação da densidade da madeira (Coutinho & Ferraz, 1988). Estando numa região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, como é o caso de Belo Horizonte, a indústria Siderúrgica tem no carvão um dos seus principais insumos. E uma enorme importância econômica para todo o estado de Minas Gerais.

A tecnologia de medida de densidade através do espalhamento Compton vem sendo utilizada e aprimorada no Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG. Equipamentos

para medida de densidade através da radiação já foram desenvolvidos neste departamento (Silva, 2004). No caso de solos, equipamento semelhante também foi utilizado para medida de umidade (Teixeira, 2005). Dando continuidade e aprofundando as pesquisas, o equipamento deste trabalho é fruto do empenho de todas as pesquisas anteriores com esta finalidade.

I-2 Fundamentos Teóricos

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 especifica 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: quando o fóton ejeta um elétron com energia igual à energia do fóton menos a energia de ligação do elétron no átomo;
- efeito Compton, que acontece quando um fóton encontra elétrons livres ou de pequena energia de ligação. Nesse efeito o fóton entrega parte da sua energia ao elétron em forma de energia cinética. A diferença entre a energia do fóton incidente e a do elétron é então transportada por um fóton secundário
- efeito de criação de pares, que acontece quando uma radiação com energia maior do que $2m_oc^2$ onde m_o é a massa de repouso do elétron e c a velocidade da luz. Este efeito produz um par elétron/pósitron onde cada uma dessas partículas tem energia igual à metade da diferença entre a energia do fóton incidente menos $2m_oc^2$.

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

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

onde μ_T é o coeficiente de atenuação total do material e representa a soma das interações realizadas pelos três efeitos.

A **Figura 1** ilustra esquematicamente o processo de espalhamento Compton. Um método de difusão gama para determinar a densidade de solos e de rochas de uma maneira não-destrutiva foi desenvolvido (Belcher *et al.*, 1950). Durante os últimos cinqüenta anos diferentes aparelhos foram estudados de acordo com as necessidades. Praticamente todos os tipos de aparelhos sofreram modificações principalmente na eletrônica de aquisição de dados. Porém, os princípios básicos das medidas de densidade e umidade são baseados na difusão e na absorção das radiações nucleares. Os tipos de equipamentos baseados no espalhamento da radiação γ são os mais usados para as medidas de densidade superficiais e também em perfis de densidade em função da profundidade de solos.

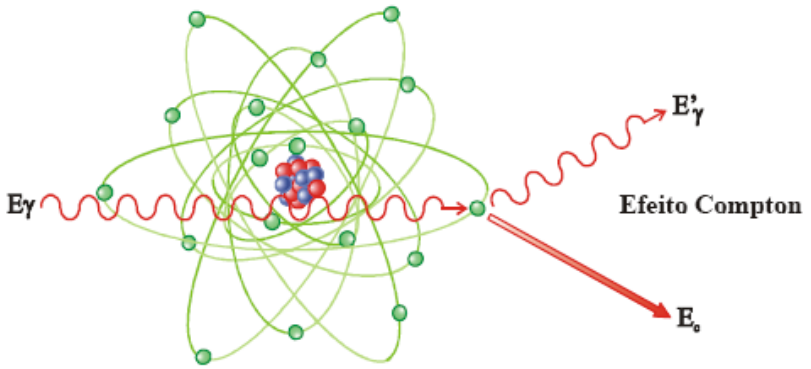

Figura 1. Representação esquemática do Espalhamento Compton (Tauhata *et al.*, 2003).

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 muito pequena de todos estes fótons espalhados e que se dirigem para o detector podem ser absorvidos.

Se considerarmos o caso em que o elétron atingido pelo fóton de energia ***Eγ*** é um elétron livre em repouso, então, a conservação do momento linear e da energia total, segundo a dinâmica relativística, nos dá que a energia do fóton espalhado ***Eγ'*** é

$$h\upsilon' = \frac{h\upsilon}{1 + \frac{h\upsilon}{m_o c^2}(1 - \cos\theta)}$$

onde **θ** é o ângulo formado pelas direções do fóton incidente e do fóton espalhado e $\boldsymbol{m_o c^2}$ a energia de repouso do elétron (Knoll, 1989).

Essa energia ***Eγ'*** pode variar desde ***Eγ***, para **θ = 0** (quando não ocorre interação), até um valor mínimo, quando **θ =180°**.

A distribuição angular do espalhamento Compton pode ser obtida através da fórmula de Klein-Nishina para seção de choque diferencial,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z\, r_o^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)\left[1 + \alpha(1 - \cos\theta)\right]} \right)$$

onde **α** é a energia do fóton em unidades de massa de repouso do elétron e $\mathbf{r_o}$ é o raio eletrônico clássico, ou seja,

$$\alpha = E_\gamma / m_0 c^2 \ , \ r_o = e^2 / 4\Pi \varepsilon_o m_o c^2 \ .$$

A **Figura 2** mostra a plotagem polar do número de fótons Compton espalhados, para uma incidência da esquerda para a direita, por unidade de ângulo sólido *versus* o ângulo de espalhamento **θ**.

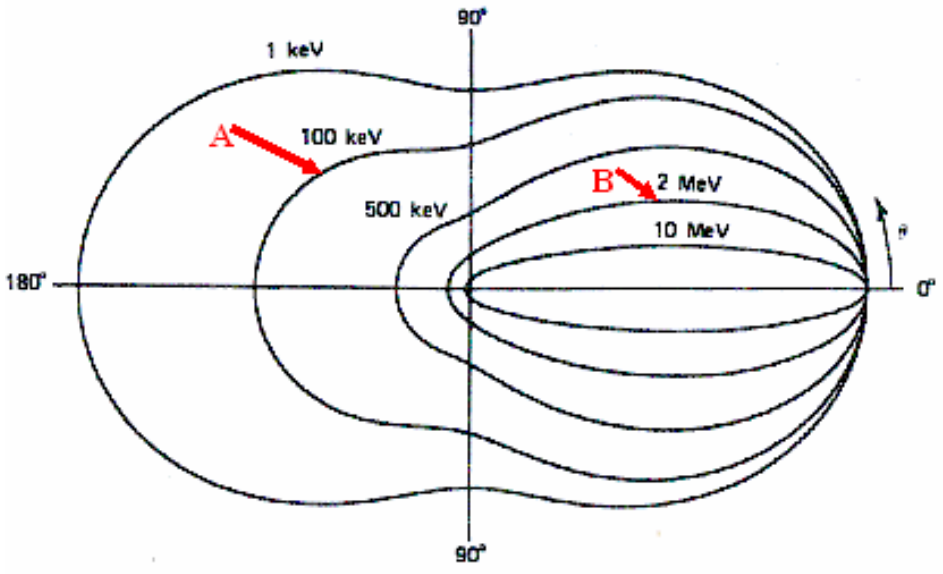

Figura 2. Variação do ângulo de espalhamento Compton em função da energia do fóton incidente, plotado em coordenadas polares (Knoll, 1989).

Observando a **Figura 2**, o destaque da seta **A** mostra que para um fóton incidente de 100 keV a probabilidade de espalhamento para ângulos maiores que 90° é bem maior que para um fóton de 2 MeV, destacado pela seta **B**. À medida que a energia do fóton incidente aumenta, a probabilidade de espalhamento para grandes ângulos diminui. O que pode ser interpretado facilmente, pois quanto maior a energia do fóton que chega maior a sua tendência em ser espalhado próximo de sua direção original, como se fosse o mesmo fóton, a menos da perda de energia pelo choque, seguindo sua trajetória *por inércia*. O mesmo fenômeno é observado em colisões inelásticas com corpos macroscópicos.

I-3 Efeito Rayleigh ou Compton Coerente

Um caso que pode ser considerado um caso particular do Efeito Compton é o chamado Efeito Rayleigh ou Compton Coerente. Neste efeito, o fóton incidente interage e

excita o átomo inteiro. Não elétrons individuais, como no Efeito Fotoelétrico ou Compton comum.

Esta interação ocorre para energias gamas ou X comparativamente mais baixas. Durante o Efeito Rayleigh, o fóton incidente gasta praticamente toda a sua energia excitando todos os elétrons do átomo alvo (Tauhata *et al.*, 2003). Os elétrons excitados começam a oscilar em fase e imediatamente irradiam, emitindo outro fóton. Este fóton emitido tem assim a mesma energia do fóton incidente, e a direção de emissão é ligeiramente diferente da original, como na **Figura 3**.

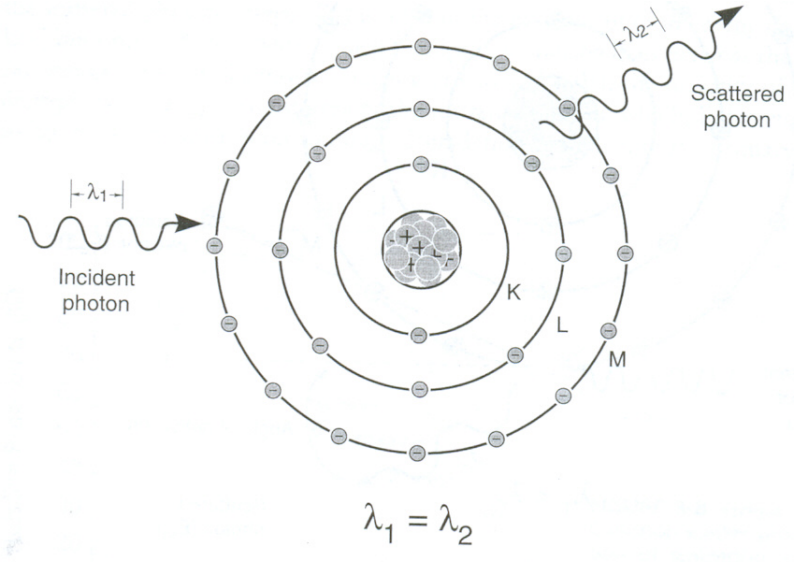

Figura 3. Representação do Efeito Rayleigh (Bushberg *et al.*, 2002).

Como elétrons não são ejetados neste processo, não há ionização. Em geral, o ângulo de espalhamento aumenta com a diminuição da energia do fóton incidente. Este efeito tem aplicações na área da Física Médica, inclusive para radiação do Amerício-241 (Stalp & Mazess, 1980; Gigante & Sciuti, 1985; Speller *et al.*, 1989). Como exemplo, pode-se citar que o Efeito Rayleigh é responsável por menos de 5% das interações para raios X de 70 keV. Já na faixa de 30 keV, o efeito é responsável por 12% dessas interações. Sendo portanto mais importante no caso da Mamografia, que trabalha justamente nesta faixa de energia (Bushberg *et al.*, 2002). A **Figura 4** mostra a contribuição do Efeito Rayleigh no coeficiente de atenuação mássico de um dos cintiladores utilizados freqüentemente na instrumentação: o iodeto de sódio.

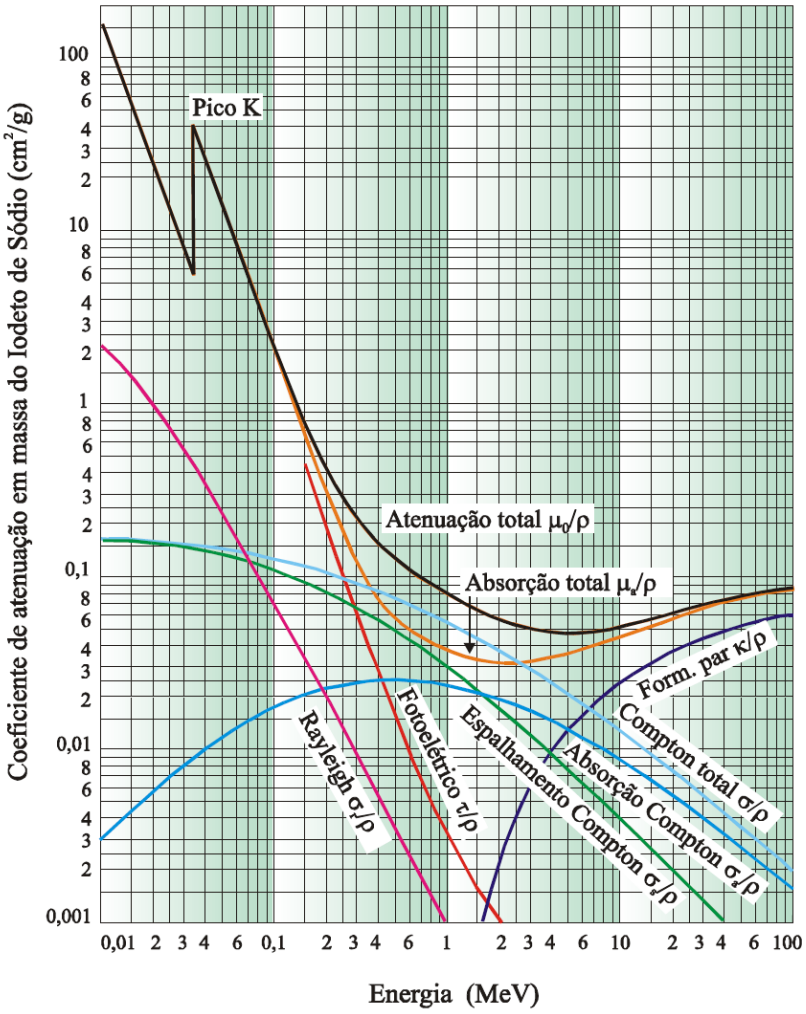

Figura 4. Contribuição dos diversos efeitos produzidos pela interação da radiação num material para o coeficiente de atenuação linear total (Tauhata *et al.*, 2003).

I-4 Guia Líquido

Para se ter uma melhor compreensão dos aspectos metodológicos é apresentado a seguir um breve resumo, sobre esses guias líquidos, baseado em diversos autores (Dress & Franke, 1997; Altkorn *et al.*, 1999; Rebourgeard *et al.*, 1999).

Os guias líquidos de luz foram estudados pela primeira em meados do século 19. No final deste 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 USA, 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 do que daquele do vidro. Esses guias, chamados de "liquid-core optical fiber (LCOF)", funcionaram muito bem mostrando perdas inferiores a oito dB/km na região do infravermelho. Mesmo assim foram considerados ineficientes para transmitir dados quando comparados com as fibras óticas de vidro (Dress & Franke, 1997).

Apesar destes resultados negativos, 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. Estes líquidos têm índices bem abaixo daqueles do vidro, não permitindo assim a ocorrência de reflexão total no interior deste tipo de tubo.

Tubos de metais altamente reflexivos ainda são usados na transmissão de fótons nas faixas das microondas e do infravermelho. Eles têm a vantagem de conduzir a luz através do líquido no interior desses tubos metálicos podendo coletar esta mesma luz em grandes ângulos. Porém, apresentam uma eficiência muito aquém dos guias líquidos de luz baseados na reflexão total (LCOF) (Altkorn *et al.*, 1999).

Na última década foram desenvolvidas resinas de teflon com coeficientes de refração que permitiam a construção de LCOFs. (Dress & Franke, 1997), mostraram 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.

Atualmente, os únicos plásticos comercialmente disponíveis capazes de guiar a luz através da água são vendidos pela DUPONT e são chamados de Teflon AF. Estes 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 se transformar em tubos, tarugos, discos, ampliando consideravelmente as aplicações das LCOFs. Os tubos de teflon AF podem ser obtidos comercialmente em 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, metanol e etanol.

II. MATERIAL E MÉTODOS

II-1 Fonte utilizada no densímetro nuclear

Em todas as montagens utilizadas nos experimentos, a fonte utilizada foi de Amerício-241. Este radioisótopo tem como principal emissão um gama de energia igual a 60 keV. Na verdade, seu decaimento é alfa, com emissão de gama secundário pelo elemento filho, Neptúnio-237, cuja energia gama foi utilizada nos experimentos. Na **Figura 5** (Beling *et al.*, 1952), vemos os modos de decaimento do Amerício-241.

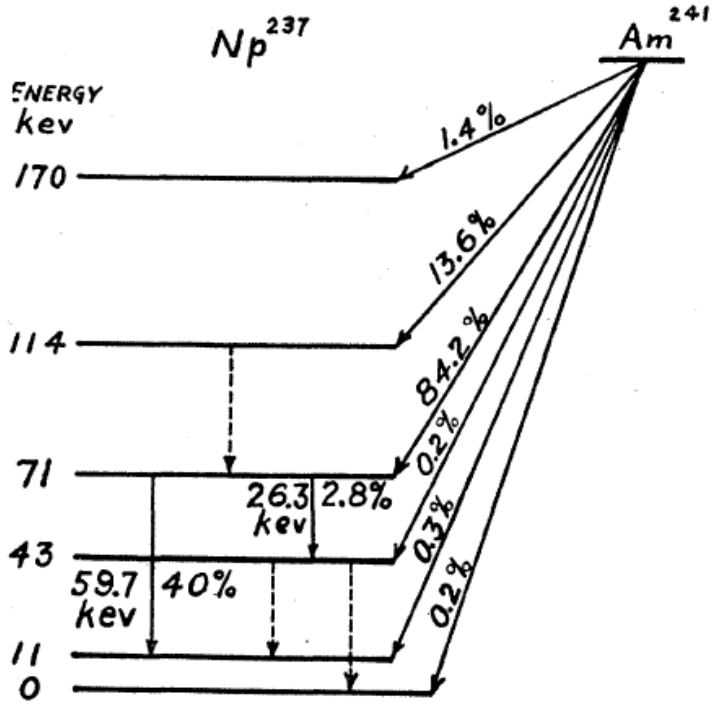

Figura 5. Principais modos de decaimento do Amerício-241.

Trata-se de uma fonte de várias outras aplicações na indústria, tais como detectores de fumaça, medidores e controladores de espessura em esteiras rolantes na produção de aço e papel e inclusive em pesquisas para prospecção de poços de petróleo.

Particularmente no caso da medida da densidade da madeira, o Amerício-241 leva uma vantagem sobre outra fonte tradicional, a de Césio-137. Sua energia é cerca de 11 vezes menor que a energia de 662 keV emitida pelo Césio. Isto possibilita uma utilização de blindagens de menor espessura e peso e, portanto, mais compactas. Algo essencial em equipamentos que se pretende portáteis. Além disto, a energia menor proporciona uma maior segurança para os operadores dos equipamentos radioativos. Por fim, sua longa meia vida, de 432 anos, permite a utilização da fonte por um longo período, sem necessidade de descartes e trocas no equipamento.

As atividades das fontes utilizadas foram de 7400 MBq (ou 200mCi) e 518 MBq (14 mCi) e suas dimensões são de 7 mm de diâmetro externo com 5 mm de diâmetro ativo e 3 mm de diâmetro externo com 2 mm de diâmetro ativo, respectivamente, e ambas com 10 mm de comprimento externo. A **Figura 6** é um esquema do manual da fonte.

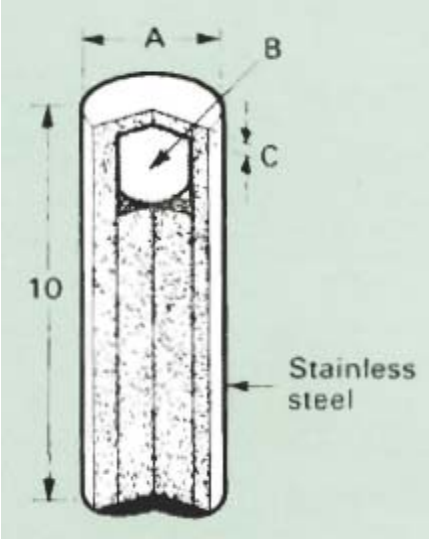

Figura 6. Esquema da fonte de Américo-241 utilizada (catálogo Amersham).

Os fótons emitidos por uma fonte de Amerício-241 de 60 KeV e que atingem um material composto de elementos químicos de baixo número atômico, como é o caso da madeira, composta basicamente de Carbono, Hidrogênio e Oxigênio, interagem principalmente por efeito Compton, coerente e incoerente. Em conseqüência produzirão fótons secundários no seu percurso nesse meio. Uma representação esquemática deste

efeito é mostrada na **Figura 7**. Tem-se assim, no material, uma região onde tem lugar todas as interações primárias. Essa região pode ser considerada como uma fonte radioativa secundária de fótons de energia variável distribuída no volume do meio.

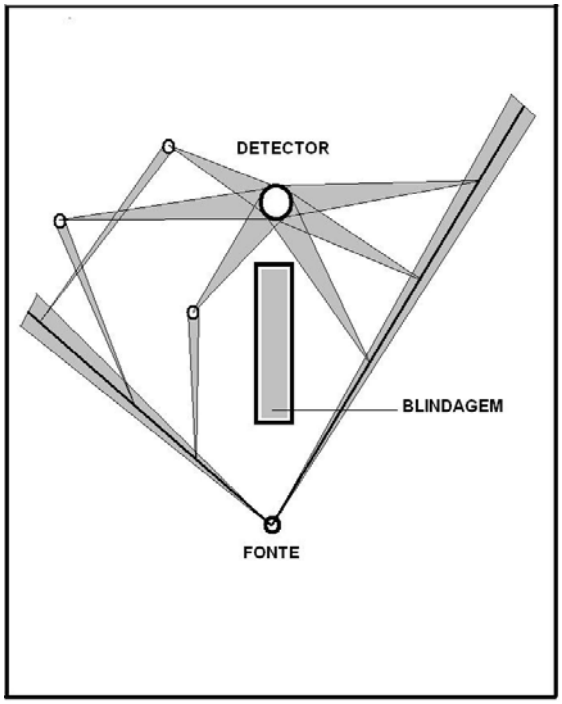

Figura 7. Representação gráfica da fonte secundária de fótons espalhados (Silva, 2004).

A intensidade desta fonte pode ser considerada como sendo o somatório de fontes situadas em volumes elementares. Pode-se observar que "a atividade específica" de cada fonte elementar, deve ser proporcional à intensidade do fluxo de fótons incidentes e que diminui seguindo uma lei exponencial. Assim, a quantidade de fótons espalhados que pode atingir o detector diminui muito rapidamente quando a radiação penetra mais no material. É necessário observar que em cada ponto desta fonte secundária a emissão não é isotrópica. Com efeito, tanto a energia dos fótons espalhados bem como o número de fótons são funções do ângulo de espalhamento. Deve-se considerar que materiais que tenham uma fração significativa de elementos pesados aumentam o efeito fotoelétrico, e em conseqüência reduzem a intensidade da fonte secundária.

Com tudo isto, pode-se afirmar então que para uma fonte puntual inserida em um meio, o fluxo de gamas secundários em um ponto qualquer numa região em torno da fonte é uma função da densidade deste meio.

II-2 Relação entre a densidade e fluxo de gamas

O fluxo de gamas secundários que atingem o detector depende tanto do número de fótons emitidos pela fonte na direção do detector como do número de fótons absorvidos até atingi-lo. As taxas de contagens aumentam com o aumento da densidade. Quando a densidade aumenta, o volume efetivo da fonte secundária diminui, fazendo com que haja um aumento na taxa de contagens devido a uma proximidade maior entre fonte secundária e detector.

A curva de calibração foi determinada relacionando uma densidade conhecida, determinada previamente por outros métodos, com a taxa de contagens. Uma vez estabelecido este parâmetro, para qualquer ponto da curva, ou seja, para qualquer contagem, corresponderá um determinado valor de densidade que pode ser medido para uma amostra qualquer.

O estudo teórico da difusão Compton é muito complexo e de difícil solução numérica. O método de Monte Carlo tem sido usado para estudar os múltiplos espalhamentos Compton em um meio conhecido (Tartari *et al.*, 1991).

II-3 O arranjo experimental

O arranjo experimental teve como objetivo a medida da densidade da madeira. Com esta finalidade, as fontes e os sistemas de detecção para medida de densidade foram preparados visando otimizar a geometria para possibilitar as medidas.

A densidade das madeiras varia de 0,4 até 1,4 g.cm $^{-3}$. Assim, os experimentos foram preparados para medidas nesta faixa. A densidade de uma amostra qualquer pode ser obtida a partir da curva contagens *versus* densidade, determinada com amostras de densidade conhecidas. Uma vez determinada a densidade através de outros métodos experimentais, que não envolvem técnicas nucleares e são padronizados pelas normas brasileiras e internacionais, pode ser feita uma comparação para se verificar a eficácia e precisão da técnica utilizada.

As medidas de densidade pela aplicação do efeito Compton coerente e incoerente foram realizadas através de dois métodos distintos, descritos detalhadamente a seguir. Realizadas estas medidas, pôde ser feita a comparação entre estes dois métodos e a comparação destes dois com as medidas tradicionais. Assim, inclusive, permitiu-se avaliar a viabilidade e aplicabilidade de cada um deles, separadamente.

II-4 Preparação das amostras de madeira

Para iniciarmos os experimentos com medidas de densidade, uma das primeiras etapas foi a obtenção de madeiras. Foram 3 fontes principais de madeiras: eucaliptos para construção civil comprados comercialmente, eucaliptos fornecidos pela empresa V&M Florestal e madeiras recolhidas no município de Serro/MG, distrito de Capivari.

Quanto aos eucaliptos comerciais, é difícil sua classificação exata, pois eucalipto compreende cerca de 70 gêneros distintos e 3000 espécies de arbustos e árvores (Oliveira et al, 2004). Podemos citar como das espécies mais utilizadas no Brasil os *Eucalyptus grandis, dunnii, tereticornis, saligna, citriodora* e *maculata* (Iwakiri et al, 2004). Particularmente os da empresa V&M são plantas desenvolvidas através de melhoramento genético, visando aperfeiçoar suas características de produção de carvão, resistência às variações climáticas, rapidez no crescimento entre outras. As amostras fornecidas vieram de árvores clonadas de outras cujas características se sobressaíram entre muitas plantas cultivadas. Estas são as escolhidas para as plantações.

Quanto às madeiras oriundas de Capivari, Serro/MG, vieram amostras das seguintes espécies:

- candeia de cerca, *Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish;
- canela de velho, *Cenostigma macrophyllum Tul*;
- sucupira preta, *Bowdichia virgilioides*;
- canela, *Ocotea spp*;
- pereira, *Platycyamus regnelii*.

Para a determinação da densidade básica das amostras, os 6 tipos de madeiras foram levados à oficina mecânica do Departamento de Química da UFMG. Produziu-se então cubos de 2 cm de aresta cada um com as seguintes espécies: candeia, canela de velho, sucupira, canela, pereira e clones de eucalipto da V&M Florestal.

Os cubos, com dimensões precisas e conhecidas, permitiram o cálculo da densidade pelo método mais simples: a razão entre a massa e o volume, este calculado geometricamente pelas dimensões (Volume = ℓ^3). A massa foi obtida em balança digital, com precisão de mg. A **Figura 8** ilustra os cubinhos de madeira.

Figura 8. Cubos de madeira de 2 cm de aresta.

Os cubinhos foram utilizados no densímetro da **Figura 10**.

Para o densímetro da **Figura 12**, as amostras foram preparadas de forma distinta. As madeiras foram perfuradas com broca de 18 mm de espessura, padronizadamente a 1,5 cm de distância da borda. Quanto à introdução da sonda do densímetro, visando manter a mesma geometria em todo o procedimento, foi utilizado o tubo de uma seringa introduzido no furo como guia. Com este apoio, conseguiu-se manter a sonda na mesma posição ao longo das medidas. A **Figura 9** ilustra os furos, feitos na amostra de madeira, para introdução da sonda.

Figura 9. Orifícios para introdução da sonda do densímetro.

II-5 Medida com fonte e cintilador externos

Neste arranjo, a fonte de Amerício-241 utilizada foi a mais intensa, de atividade igual a 7400MBq (ou 200mCi). Ela foi colocada em uma blindagem de chumbo sobre a bancada de experimentos, com uma abertura superior permitindo a saída de um feixe de radiação cobrindo todo o volume dos cubinhos de madeira de 2 cm de aresta. Estes, por sua vez, foram apoiados sobre uma camada plástica de menos de 1 mm de espessura, cuja atenuação da radiação pode ser considerada insignificante.

Também sobre a bancada, foi instalado o sistema de detecção da radiação, com um cintilador de Iodeto de Sódio ativado com Tálio (NaI(Tl)) colocado a um ângulo de 90°

com a direção do feixe de radiação incidente. Um esquema da montagem está ilustrado na **Figura 10**.

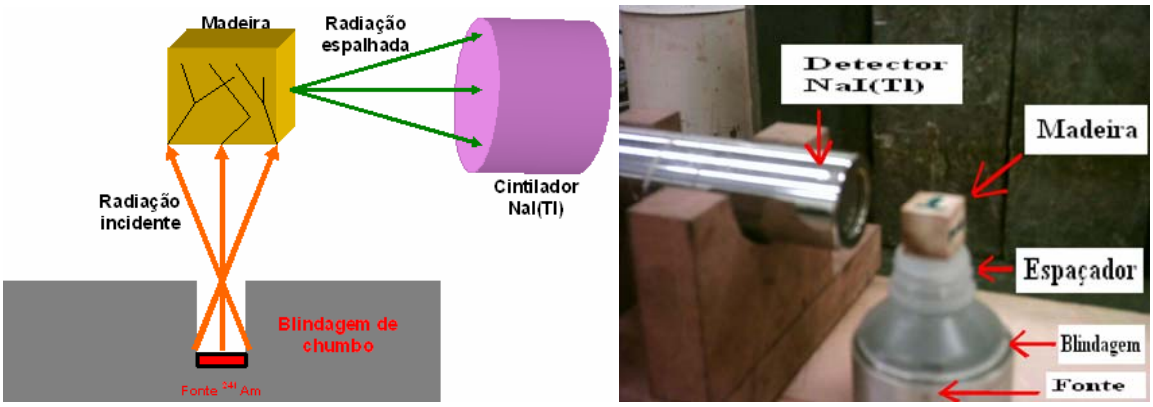

Figura 10. Esquema do arranjo para medida de densidade com fonte e cintilador externos.

A radiação proveniente da fonte interage com as amostras de madeira e é espalhada. Parte desta radiação, espalhada por Efeito Compton, é contada no cristal cintilador. Para cada tipo de madeira, foram feitas as contagens em vários cubinhos de amostras, para cálculo da média e erros.

II-6 Medida com a sonda introduzida na madeira e guia líquido

Neste outro arranjo experimental, a fonte de Amerício-241 utilizada foi a de 518 MBq (14 mCi). Isto exatamente porque é necessário um esquema mais compacto, para introdução da sonda na madeira. 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 11** uma fotografia feita durante a montagem da sonda.

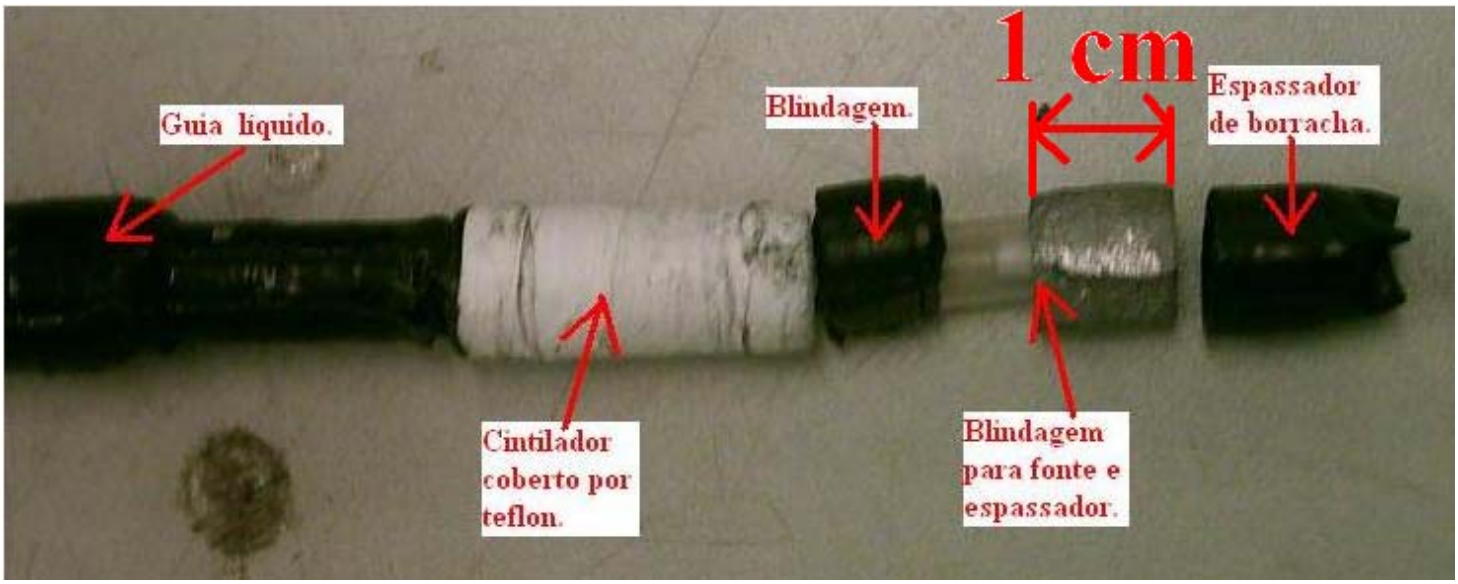

Figura 11. Montagem da sonda para introdução na madeira, sem a fonte.

Nesta montagem, a fonte é introduzida numa blindagem de chumbo que evita 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, toda a radiação que vier a atingir o cintilador terá necessariamente interagido com a madeira. 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 a madeira 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 12**.

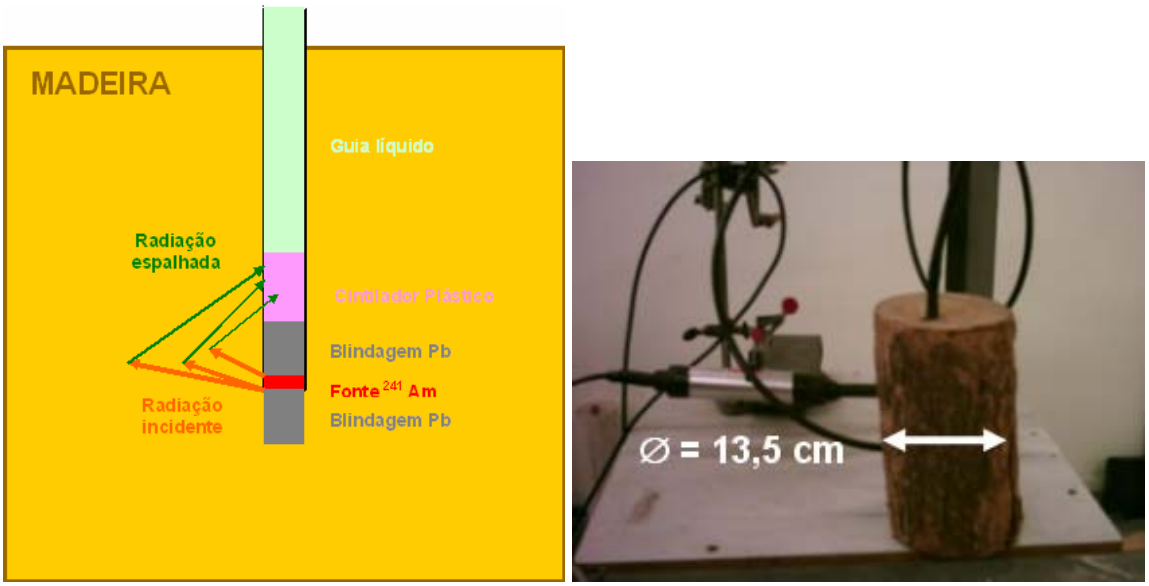

Figura 12. Esquema para medida da densidade com sonda introduzida na madeira.

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 a madeira e é atenuada, fazendo com que a radiação externa ao experimento seja bem pequena.

Para introdução da sonda, um orifício foi feito nas amostras de madeira, com furadeira e broca. Após a introdução, o sistema de contagens foi posto em funcionamento e feitas uma série de medidas em cada uma das amostras, para cálculo da média e erros estatísticos.

II-7 Detectores de Cintilação

Os detectores cintiladores são constituídos de materiais que produzem luz quando excitados pela passagem de partículas carregadas. Os cintiladores, devido a sua maior densidade, são mais eficientes para a detecção de radiação γ do que os detectores gasosos e do estado sólido. Além disso, também medem a energia da partícula detectada. Nos cintiladores inorgânicos, o elétron da interação primária provoca excitação dos níveis eletrônicos do cristal, que decaem por emissão de fótons na região da luz visível. O número total de fótons produzidos é aproximadamente proporcional a energia da radiação detectada.

Quando fótons da fonte secundária incidem sobre um cintilador, provocam efeitos do tipo Compton e Fotoelétrico. Os elétrons resultantes dissipam sua energia no cintilador. Esta parte é convertida em fótons de luz. O restante da energia é dissipado em forma de calor gerado pelas vibrações da rede cristalina. Os fótons emitidos devido à fluorescência pelo cintilador estão na faixa da luz visível (400 a 700nm).

A eficiência de cintilação para um cintilador é definida como a fração da energia de todas as partículas incidentes que é transformada em luz visível. Para converter este pulso luminoso em um pulso elétrico, é utilizado um tubo fotomultiplicador. O tubo fotomultiplicador consiste de um cátodo, diversos eletrodos (dínodos) e um ânodo. A luz proveniente do cintilador incide sobre o cátodo produzindo efeito fotoelétrico. Os foto-elétrons são acelerados eletrostaticamente em direção ao primeiro dínodo onde produzem elétrons secundários em maior número, os quais são acelerados até o segundo dínodo e assim por diante até que chegue ao ânodo um grande número de elétrons, proporcional ao número de foto-elétrons inicial.

O pulso elétrico assim formado traz informação da energia da radiação depositada sobre o detector. No caso de cintiladores, o tempo morto é muito menor do que para os contadores Gaiger, por exemplo, e depende essencialmente do tempo de população e de decaimento dos níveis eletrônicos responsáveis pela cintilação (da ordem de centenas de nanosegundos).

II-8 Detector Cintilador Plástico NE-102

O cintilador NE-102A é equivalente aos cintiladores RP-400 na REXON e ao BC-400 da BICRON. A base deste cintilador é 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 derreter-se é de 70 ºC. Eles são solúveis em solventes aromáticos, acetona, solventes clorados etc. e não são afetados por água, ácidos diluídos, alcalóides, abaixe álcoois, metil puro, graxa, ou líquido.

Os cintiladores plásticos oferecem uma boa eficiência de detecção, são de fácil manipulação e têm um custo relativamente baixo. O NE-102 apresenta o tempo de decaimento do pulso de luz igual a 2 ns. Estes pulsos atingem o fotocatodo de um tubo fotomultiplicador REXON type 800P-10HA, e produzem pulsos elétricos que são detectados por sua placa accuspect NaI Plus. Este tempo de decaimento dos pulsos de luz é praticamente desprezível considerando que as taxas de contagens são em sua maioria menores do que 3000 cps.

II-9 Preparação do Cintilador Plástico

Para a preparação dos cintiladores orgânicos (plásticos), **Figura 13**, foi utilizada técnica de polimento comum, pois a intenção é tornar o cintilador o mais brilhante e transparente possível e que toda a luz produzida dentro do cintilador seja facilmente canalizada para a superfície do guia líquido de luz.

Figura 13. Esquerda - cintilador orgânico inteiro e um cortado ao meio, para ser usinado e polido antes de sua utilização; direita - cintiladores orgânicos utilizados no experimento.

A preparação envolve muitas etapas, inicialmente deve-se lixar com uma lixa d'água 220 (via úmida) até se obter uma peça uniforme. Este processo deve ser repetido com as lixas nº 440, 620, 1200 e 2000.

No processo de polimento, foi utilizada uma furadeira de nove velocidades, na menor velocidade e com água. Deve-se manter a peça sempre fria, pois os cintiladores plásticos não podem ser aquecidos, já que eles se fragmentam e perdem a sua estrutura e capacidade de cintilação. Assim, a paciência para realização do trabalho todo lentamente é essencial para a sua eficiência. Uma das etapas foi fotografada, **Figura 14**.

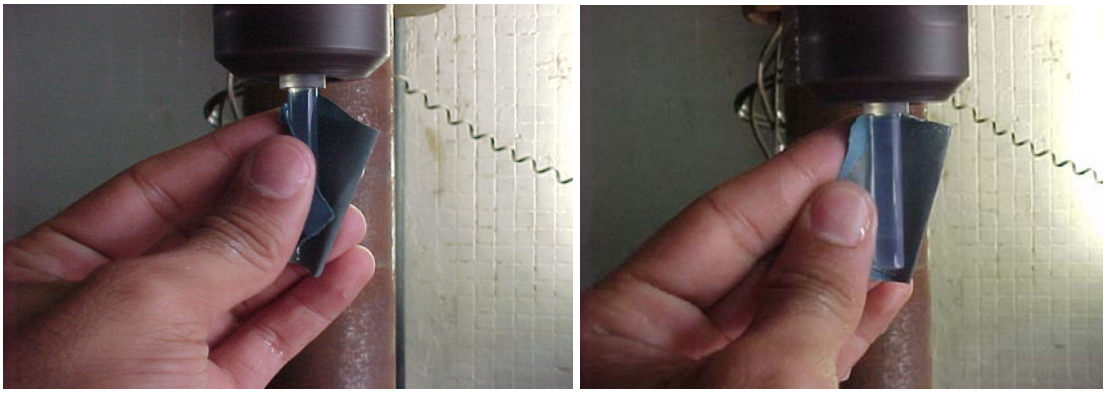

Figura 14. Método utilizado para lixar e dar polimento vertical nos cintiladores orgânicos usinados.

O controle da temperatura do cintilador é de extrema importância, pois toda vez que se promove cortes na peça para a produção de geometrias diversas há um risco muito grande de gerar lesões no cintilador. A temperatura do cintilador não deve ultrapassar os 60 ºC. Após a série de tratamentos da peça com as mais variadas lixas, começa-se um novo tratamento, de forma a promover a transparência e o brilho.

O preparo da peça envolve a utilização de cera de carnaúba. Como a cera é muito dura, deve-se tomar cuidado para que não venha a riscar a peça, pois uma lesão neste momento remete a peça novamente ao inicio do processo a depender da profundidade da avaria. A cera de carnaúba é uma das substâncias que melhora a transparência da peça, pois ela adere à superfície irregular e uniformiza a face da peça. O que é importante para a reflexão da luz.

É importante lembrar que a peça pode receber de 2 a 3 demãos da cera de modo que ela atinja um grau de transparência e brilho desejados. Cada demão da cera deve ser acompanhada de uns 10 minutos de descanso seguido de um polimento com flanela de algodão, tomando a precaução com a elevação da temperatura.

Figura 15. Diferença de peças polidas e não polidas.

Uma outra etapa consiste na utilização de um produto a base de abrasivos e que também contém a cera de carnaúba. Este produto da empresa Johnson & Johnson, vendido em supermercados, possui nome fantasia de “Bravo”. Tem a finalidade maior de dar brilho a peça. Por se tratar de um produto liquido, basta-se embeber o pano com ele e aplicar

sobre a peça. Deve-se esperar cerca de 10 minutos e dar polimento com um pano seco. Na hora do polimento é recomendável aplicar-se a maior energia possível, mas não deixar a temperatura exceder os 60 °C, pois acabaria danificando o cintilador e dependendo do estrago poderia provocar a perda total da peça. Deve-se tomar cuidado para não deixar fios ou "fiapos" do tecido de algodão grudar na peça, pois sua remoção só será possível através de lixas e isso implicaria na perda do trabalho. E visível a olho nu a diferença entre peças polidas e não polidas, como na **Figura 15**.

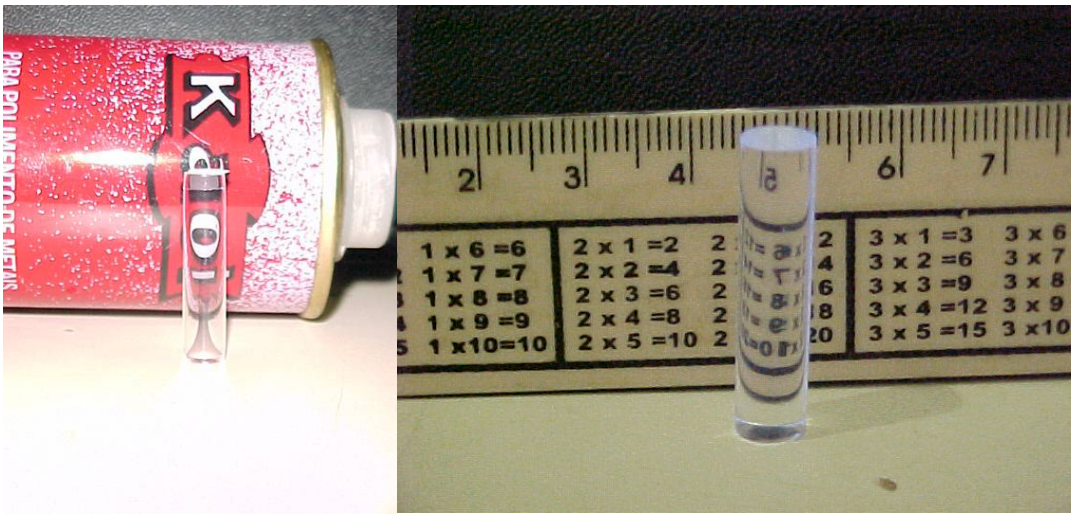

Figura 16. Transparência e brilho adquiridos pelos cintiladores após tratamento adequado. O cintilador da foto à esquerda não foi tratado com Kaol.

Um outro método também foi utilizado, e consiste em deixar a peça dentro de um recipiente de vidro contendo o produto chamado "Bravo" a uma temperatura de no máximo 60 **°C** controlada através de um termômetro analógico por um período igual há 15 minutos em uma estufa. Com este procedimento, a solução adere mais profundamente ao cintilador e também apresenta resultados satisfatórios, como na **Figura 16**. Após a retirada da peça do banho em solução, esta é levada a furadeira para dar o polimento final.

Também chegou a ser testado um produto comercialmente chamado de "Kaol", que seguiu os mesmo passos aqui já descritos e em nenhum dos procedimentos obteve-se um resultado satisfatório. Em todos os casos esse produto degradou a transparência já adquirida pela peça com a utilização da cera de carnaúba.

II-10 Guia Líquido de Luz

Os guias líquidos de luz , tubos de Teflon AF preenchidos com água,tem uma excelente transparência e um baixo índice de refração. Estas características permitem a transmissão dos fótons, através da reflexão total, do cintilador para o fotocatodo praticamente sem perdas de luz. O índice de refração do teflon AF é de 1,29 e da água 1,33.As aplicações do uso dos guias líquidos nas pesquisas estão principalmente na espectroscopia de fluorescência Raman e de absorbância (Altkorn *et al.*, 1997)

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

Os guias liquido de Luz utilizados no experimento foram adquiridos da empresa ROFIN (www.rofin.com). Estes guias são comercialmente disponíveis em vários comprimentos e diâmetros diferentes. A **Figura 17** mostra os detalhes destes guias líquido comerciais produzidos pela ROFIN.

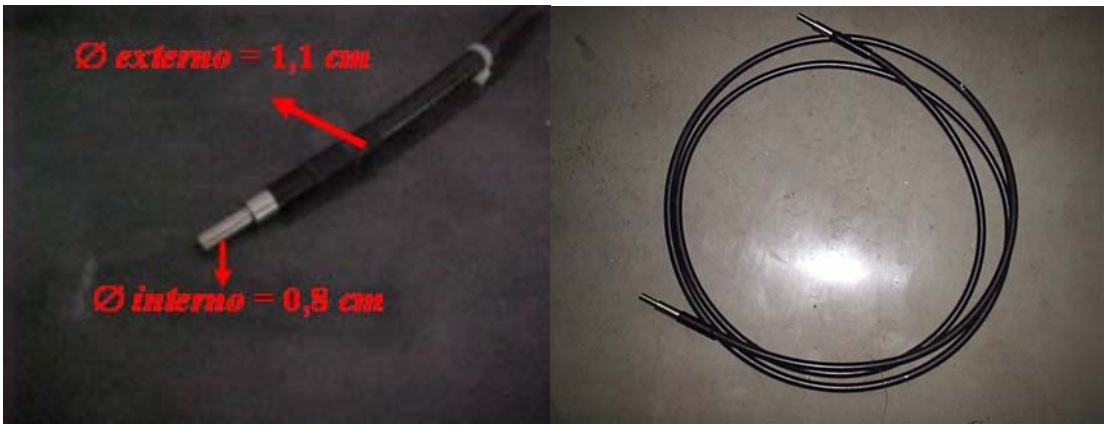

Figura 17. Esquerda - detalhe da ponta de um guia-liquido; direita - um guia-liquido de 3 metros de comprimento.

O tubo de Teflon AF é protegido por tubos Flexíveis de metal que permitem curvar o guia liquido sem danificar o tubo de Teflon, **Figura 17**. Cada extremidade tem uma peça para acoplar o guia de Teflon AF ao cintilador e o fotocatodo da fotomultiplicadora

O funcionamento do guia líquido é ilustrado na **Figura 18**, na qual, obstruindo uma das extremidades, observa-se que a luz não se propaga em seu interior.

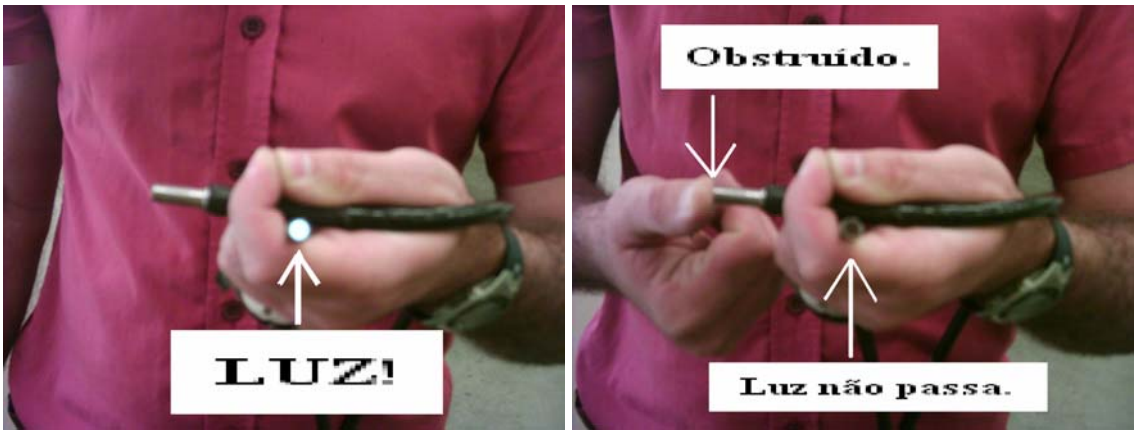

Figura 18. Funcionamento do guia líquido.

II-11 Simulações e programação do MCNP - 4C

O código Monte Carlo MCNP-4C para cálculos e simulações de interação da radiação com a matéria é uma ferramenta consagrada na área Nuclear. Por sua versatilidade e eficiência como ferramenta de estudo e pesquisa, foi escolhido para a realização dos cálculos iniciais visando otimizar o desempenho do densímetro. Além do que, o código já vem sendo utilizado como ferramenta para estudos sobre múltiplos espalhamentos, como será o caso do densímetro, em um meio conhecido (Tartari *et al.*, 1991).

Sua aplicação permitiu, desde os primeiros estágios do projeto, a montagem do detector levando-se em conta a geometria mais eficiente na montagem da sonda, a

blindagem adequada à radiação proveniente da fonte, os limites de eficiência na detecção pelo equipamento e o estudo da resposta do detector em função da variação da densidade da madeira.

II-11.1 Estudo da blindagem adequada ao Amerício-241

As fontes de Amerício-241 são bem conhecidas e possuem várias aplicações na área nuclear. O radioisótopo é produzido por ativação com nêutrons térmicos e é essencialmente um alfa-emissor, decaindo para o Neptúnio-237. A partícula alfa tem baixo poder de penetração e, portanto, fica barrada na própria blindagem da fonte. A radiação utilizada é então o fóton γ cuja energia é de 60 KeV, que ocorre em 35% dos decaimentos. Os demais modos de decaimento, e são vários, para gamas de diferentes energias, são de probabilidade muito baixa.

Como o densímetro trabalha detectando a radiação espalhada após a interação com o meio, madeira, neste caso, é necessário evitar que a radiação proveniente da fonte atinja diretamente o cristal cintilador. Para tanto, na montagem do aparato experimental, é introduzida uma blindagem de chumbo, material de alto poder de atenuação, entre fonte e detector. Tal esquema, ilustrado na **Figura 19**, cumpre o papel de permitir apenas a detecção da radiação de interesse: a espalhada. A blindagem ideal foi estudada com o MCNP-4C.

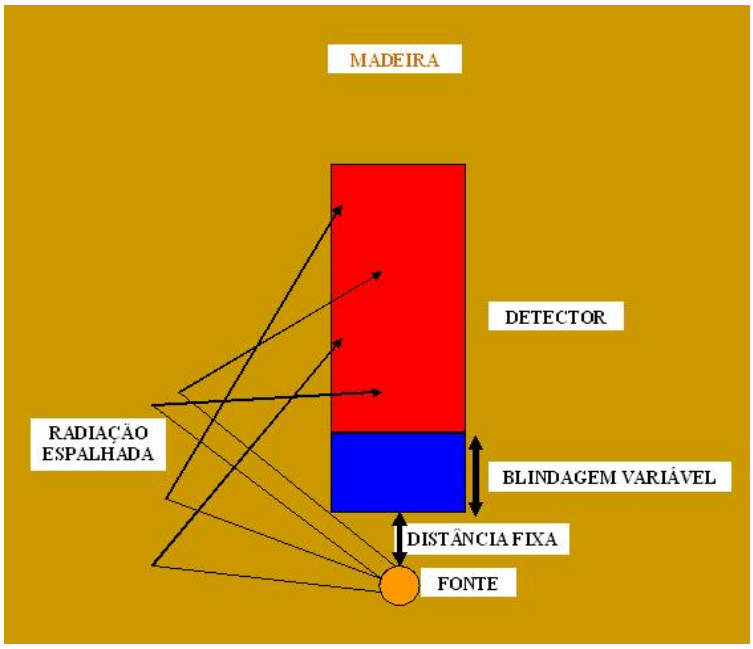

Figura 19. Esquema do estudo da blindagem necessária.

Foi feita a programação do Monte Carlo, considerando a fonte de Amerício-241 em posição fixa, bem como o cristal cintilador, imersos em um meio contendo apenas madeira. Fazendo a espessura da blindagem de chumbo variar de 0,05 a 2,50 mm, foi estudada a contagem de fótons pelo detector à medida que a espessura da blindagem aumentava de 0,05 em 0,05 mm. Esta contagem foi feita pelo fluxo de fótons que atingiam o volume programado para o detector.

II-11.2 Estudo da posição ideal da fonte

Uma vez estudada a blindagem, o próximo passo foi estudar a posição adequada da fonte de Amerício-241 em relação à blindagem e ao detector. Uma observação da geometria do problema em questão mostra que uma aproximação da fonte em relação à blindagem faz com que uma maior parte da radiação seja barrada na mesma, diminuindo o ângulo para que a radiação espalhada na madeira atinja o detector. Por outro lado, se o

afastamento da fonte aumenta o ângulo de possibilidade de detecção para a radiação espalhada, também aumenta a distância entre fonte e detector. Por isto, a contagem tende a diminuir visto que a atenuação irá se intensificar na madeira devido justamente a uma distância maior a ser percorrida pela radiação. O esquema da **Figura 20** pode ser comparado ao da **Figura 11**, onde é visível o espaçador.

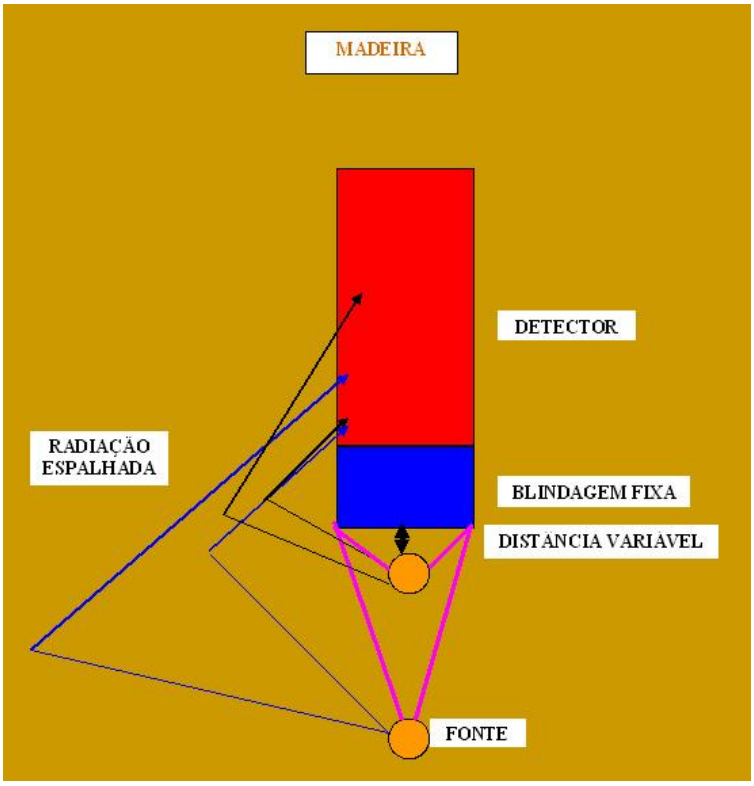

Figura 20. Visualização da influência da distância entre a fonte e a blindagem no densímetro.

Para o estudo específico da distância ideal entre fonte e blindagem, a programação foi feita variando esta mesma distância entre 0,15 até 1,00 cm, de 0,1 em 0,1 mm, já utilizando a blindagem adequada, calculada na primeira etapa. Uma verificação dos cálculos permitirá a escolha da melhor distância na posição em que as contagens pelo detector forem maximizadas, demonstrando uma maior eficiência na contagem justamente nesta posição.

II-11.3 Influência da geometria da amostra de madeira

Como o detector trabalha inserido na amostra de madeira cuja densidade se deseja medir, é necessário se levar em conta as suas dimensões. As amostras para medida de densidade são retiradas diretamente dos troncos das árvores, apresentando uma forma aproximadamente cilíndrica. A medida da densidade está baseada na interação da radiação com a matéria. Se a madeira for de pequenas dimensões, corre-se o risco do fóton de radiação escapar sem interação. Deve existir um limite de tamanho, dimensões mínimas da madeira, para que a detecção da radiação seja possível.

Fez-se então a programação e os cálculos no Monte Carlo para determinação do diâmetro mínimo das peças de madeira utilizadas para determinação da densidade, para o raio da amostra variando de 1,0 em 1,0 cm. De forma prática, estes cálculos estabelecem os limites mínimos para a detecção do densímetro.

II-11.4 Simulação de um densímetro com Amerício-241 para diferentes geometrias

Foram feitas simulações das respostas do densímetro a ser montado, em duas geometrias distintas. Numa montagem, a fonte foi colocada externamente à madeira e, na outra, a própria fonte estava inserida na madeira. Desta maneira, foi possível avaliar a possibilidade de se fazer as medidas de densidade da madeira com os densímetros que foram construídos posteriormente.

Prevendo que o espalhamento Compton poderia ser um processo para medida de densidade com a fonte interna, simulou-se a medição da densidade numa geometria distinta e alternativa. Neste caso, fonte e detector estariam externos à madeira.

A radiação proveniente da fonte atingiria uma amostra de madeira colocada sobre a fonte, esta devidamente blindada com abertura para passagem de apenas um feixe de radiação. O detector simulado estaria em um ângulo de 90º com a radiação incidente, captando a radiação espalhada, das fontes secundárias devido ao Efeito Compton nas amostras de madeira.

Obedecendo aos parâmetros anteriormente determinados pelos resultados das simulações com relação à blindagem, à posição da fonte e aos limites de detecção, foi feita a programação do densímetro inserido na madeira, para a densidade variando de 0,1 em 0,1 $g.cm^{-3}$, dentro portanto da faixa de densidade da madeira (Laboratory, 1999).

Esta simulação permitiu uma previsão importante sobre a funcionalidade ou não do sistema de medição montado posteriormente. Afinal, caso o programa mostrasse uma correlação inexistente entre variações na densidade da madeira e número de contagens obtidas pelo detector, todo o projeto seria considerado ineficaz.

Para uma uniformização das amostras, a sonda precisou ser colocada próxima à extremidade da madeira, a uma distância de 1,5 cm da borda. Isto se fez necessário visto que as madeiras obtidas para teste vieram em diferentes diâmetros e comprimentos.

III. RESULTADOS

III-1 Medida da densidade da madeira pela razão massa/volume

Uma vez preparados os bloquinhos de 2cm de aresta, a densidade das madeiras foi medida pela razão massa/volume. A massa foi obtida em uma balança com precisão de mg e o volume calculado como $V = \ell^3$. A **Tabela 1** mostra a densidade obtida para as diversas amostras de madeira.

Tabela 1. Densidade das madeiras obtidas pela relação massa(g) / volume(cm^3).

Madeira	Densidade ($g.cm^{-3}$)	σ
Eucalipto	0,83	0,01
Candeia de cerca	0,90	0,01
Canela de velho	0,88	0,03
Sucupira	0,79	0,01
Canela	1,04	0,03
Pereira	0,76	0,01

Durante o corte das madeiras na oficina mecânica do Departamento de Química da UFMG, percebeu-se que devido a suas características estruturais e fisiológicas, algumas permitem o corte com maior precisão que outras. Com isto, os bloquinhos feitos com alguns tipos de madeira apresentam uma regularidade maior do que com outras. Esta diferença se manifesta nos erros, na última coluna da **Tabela 1**. Devido a essas variações na precisão do corte, algumas madeiras apresentaram diferenças maiores nos bloquinhos e erros maiores.

III-2 Medida da densidade com detector e fonte externos

A primeira medida de densidade feita utilizando-se técnicas nucleares foi com os bloquinhos de madeira, com detector e fonte externos (**Figura 10**). Os resultados das contagens estão apresentados na **Tabela 2**, organizados por ordem crescente de densidade. O erro nas contagens não foi considerado por ser menor do que 1% em todos os casos.

Tabela 2. Média das contagens nos bloquinhos de madeira sem o background.

Madeira	**Densidade ($g.cm^{-3}$)**	**Contagens**
Pereira	0,76	67000
Sucupira	0,79	71885
Eucalipto	0,83	73006
Canela de velho	0,88	77326
Candeia de cerca	0,90	78543
Canela	1,04	86815

Uma análise preliminar da **Tabela 2** já mostra um aumento das contagens com o amento da densidade da madeira. A medida em que a densidade da madeira aumenta, a interação da radiação por efeito Compton espalha mais fótons que são contados no detector. A geometria do sistema é mantida, uma vez que os bloquinhos foram sempre colocados na mesma posição. Os dados fornecem uma medida da densidade, conforme ilustra a **Figura 21**. Nela está plotada a regressão linear entre os dados das contagens e a densidade das madeiras previamente calculada.

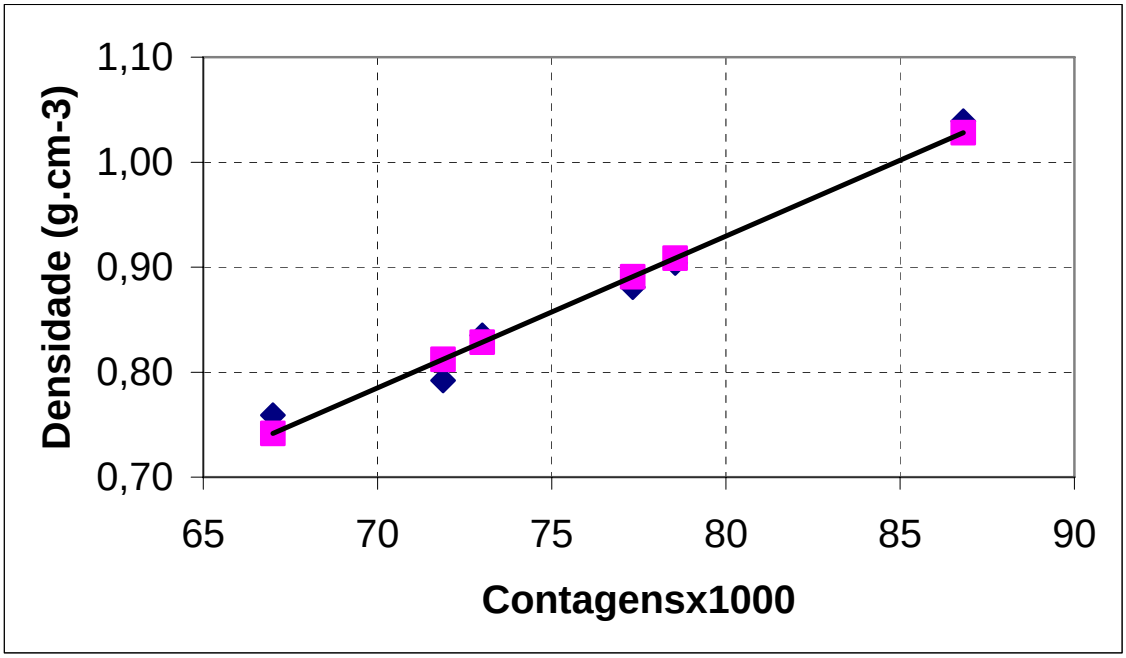

Figura 21. Gráfico da densidade *versus* contagens.

O coeficiente de correlação (R quadrado) é de 0,979 e mostra uma relação entre as contagens obtidas e a densidade da madeira. Um ponto apenas fica fora da linha de tendência, para a madeira sucupira, a segunda em ordem crescente de densidade. Como os dados mostram uma boa relação entre contagens e densidades para as outras amostras de madeira, sugerem que pode ter havido algum problema nesta medida específica.

A sucupira apresentou falhas na superfície de corte. Isto explica o ponto fora da linha de tendência. Fazendo a regressão sem o dado da sucupira, o coeficiente de correlação melhora, para 0,989, o que demonstra um aumento na precisão do método. A plotagem da regressão excluindo a sucupira está na **Figura 22**.

Desta maneira, as densidades calculadas previamente servem como parâmetro para calibração do densímetro. Uma vez estabelecida a relação entre contagens e densidades, pode-se utilizar o método para determinação da densidade de uma amostra de madeira qualquer.

A densidade de uma amostra de madeira é calculada a partir da curva de calibração. O que é uma vantagem em relação à primeira medida que efetuamos, na **Tabela 1**, para

qual é necessária a preparação das amostras, com corte de madeira e a pesagem individual de cada um dos diversos bloquinhos obtidos.

A curva de calibração obtida é descrita pela equação abaixo:

$$D = (1{,}40 \pm 0{,}08).10^{-5}\ C + (-0{,}19 \pm 0{,}06)$$

onde **D** é a densidade ($g.cm^{-3}$), **C** é a contagem obtida e os valores, com seus respectivos erros, foram obtidos da regressão.

Outro fato a ser considerado é que as contagens apresentaram uma relação linear com a densidade. O que indica que trabalhar com um densímetro de Amerício-241, de energia baixa quando comparado ao Césio-137, é uma vantagem para a faixa de densidade da madeira.

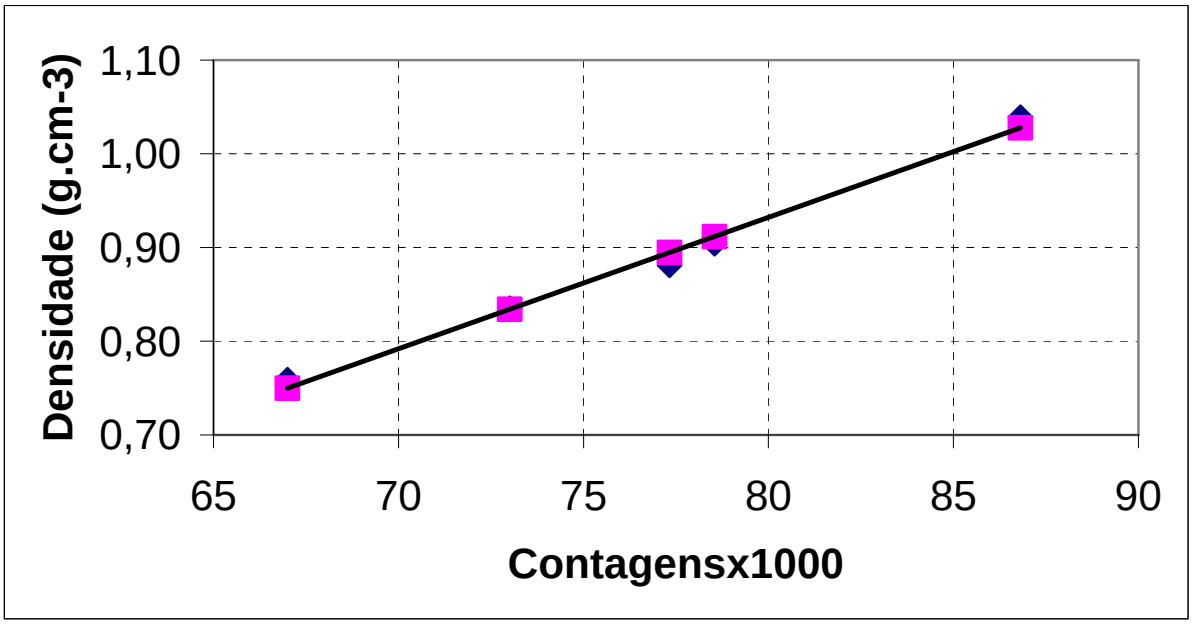

Figura 22. Gráfico da regressão excluindo a sucupira.

III-3 Medida da densidade com fonte interna e guia líquido

Utilizando-se o guia líquido e a sonda (**Figuras 11** e **12**), os resultados obtidos para as contagens encontram-se na **Tabela 3**. Devido a sua forma irregular, duas madeiras não puderam ser preparadas para este tipo de montagem: candeia de cerca e canela de velho. Seus troncos cheio de reentrâncias não permitiram uma reprodutibilidade nas medidas. Quanto às outras madeiras, os furos próximos á borda deram uniformidade ao volume das amostras e confiabilidade às medidas realizadas.

Tabela 3. Média das contagens obtidas nas madeiras para sonda interna.

Madeira	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Contagens	σ
Pereira	0,76	81391	225
Sucupira	0,79	82852	305
Eucalipto	0,83	87559	283
Canela	1,04	102788	327
"Desconhecida"	0,90 (*)	92609	311

(*) Valor obtido pela curva de calibração.

Para testar o sistema de medição, a densidade de uma amostra de madeira "desconhecida" foi calculada a partir da curva de calibração obtida através de regressão linear com os dados da **Tabela 3**. Esta nova curva, para este sistema, é dada por:

$$D = (1{,}28 \pm 0{,}05).10^{-5}\,C + (-0{,}28 \pm 0{,}05)$$

Posteriormente, o valor da densidade desta amostra foi verificado pelo método da imersão, descrito anteriormente, no qual a massa é pesada e o volume obtido pelo deslocamento de líquido em um recipiente graduado, conforme as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Feita a regressão linear para os valores obtidos, o coeficiente de correlação foi de 0,996, valor ainda melhor que o obtido nas contagens feitas nos bloquinhos. Os coeficientes

da regressão permitiram a calibração do sistema. Com eles, o valor obtido para a densidade da madeira desconhecida foi de 0,9±0,1 g.cm^{-3}. A **Figura 23**, que mostra justamente a plotagem desta regressão.

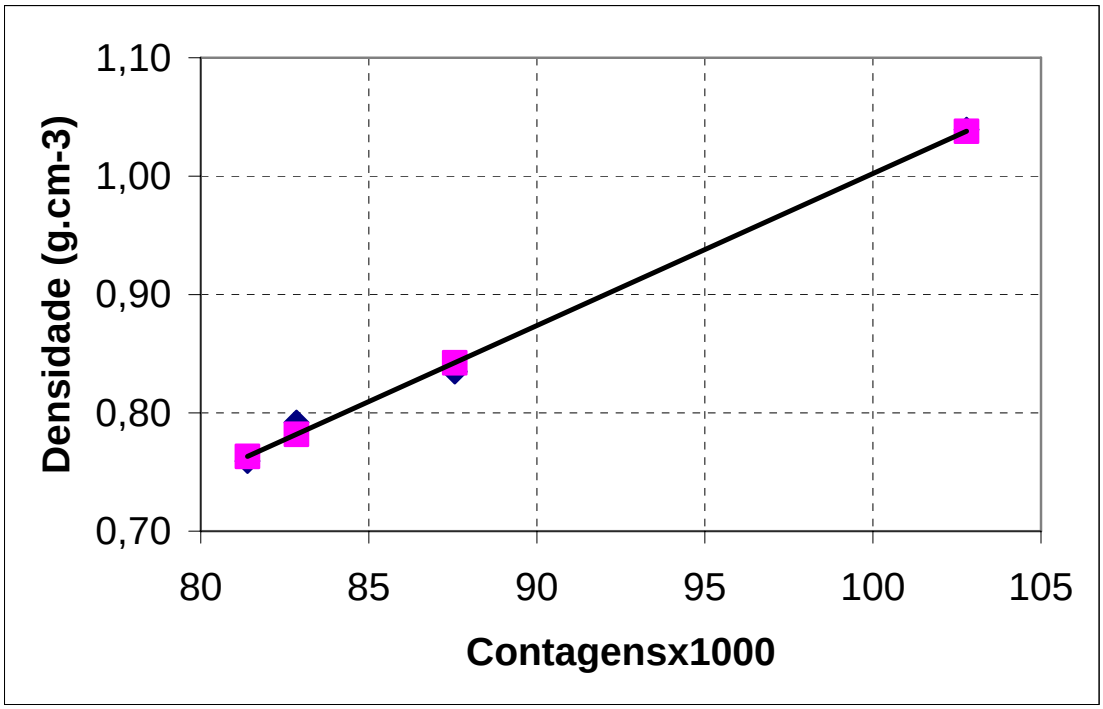

Figura 23. Gráfico da regressão para as medidas com a sonda e fonte dentro da madeira.

Quanto à precisão nas medidas, podem ser justificados pelas diferenças na posição da sonda quando introduzida nas amostras. Apesar da utilização de um tubo de seringa como guia, ainda assim houve variações pequenas. E o desvio padrão σ, em todas as contagens, foi percentualmente pequeno.

Para comparação e utilizando-se do método da imersão, o valor obtido da densidade desconhecida foi de 0,9±0,1 g.cm^{-3}, em conformidade com o calculado através da curva. O erro maior nesta última medida se deve à graduação do recipiente utilizado para medida do volume, além do fato de o método envolver uma aferição visual da medida. O que por si só já contribui para a introdução de erros.

III-4 Comparação entre os dois densímetros

Uma vez realizadas as medidas da densidade da madeira pelos dois métodos distintos e feitas as curvas de calibração para cada um destes métodos, é interessante se comparar estas duas medidas. Para tanto, a **Figura 24** mostra o gráfico da medida da densidade feita com detector externo *versus* a mesma densidade medida com a sonda interna.

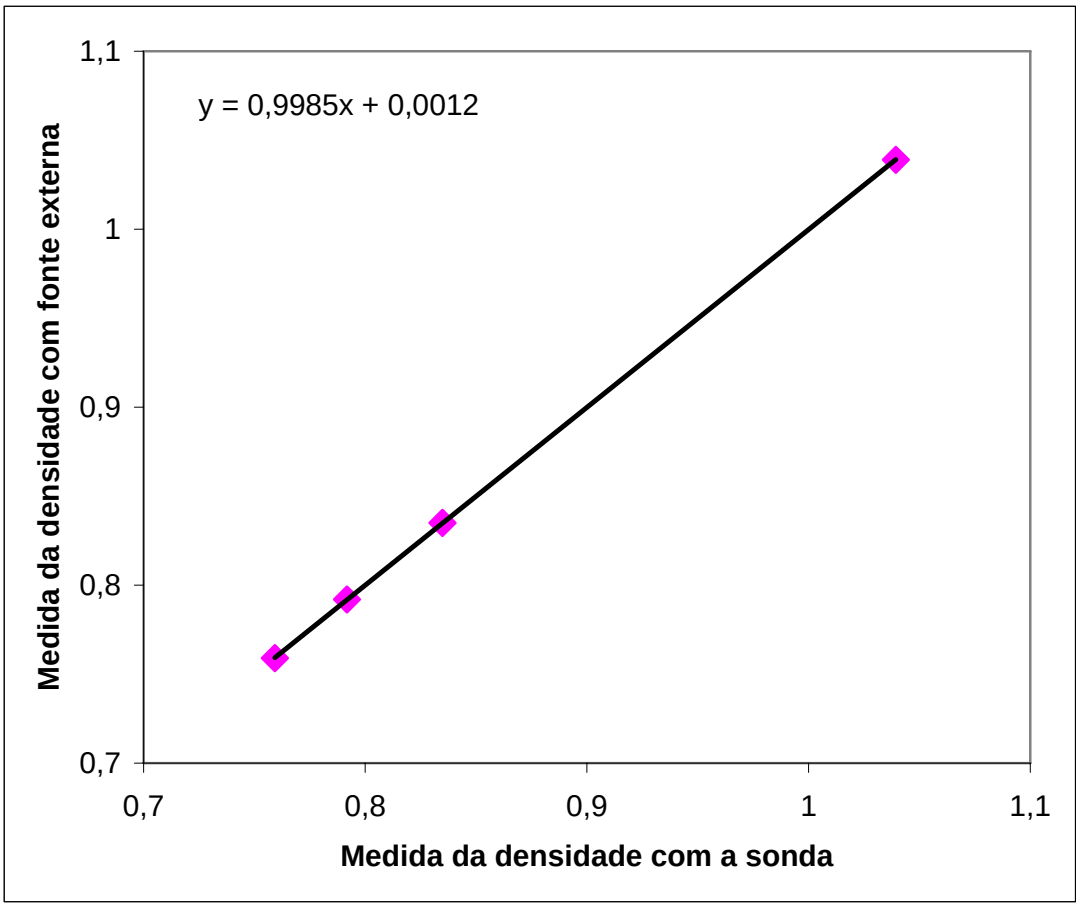

Figura 24. Medida da densidade (g.cm^{-3}) com fonte externa *versus* medida com fonte interna.

A esquerda da figura foi colocada a equação da reta. O coeficiente de correlação foi de 0,99 , próximo de 1, mostrando que os dois métodos foram semelhantes nas medidas que

executaram. Afinal, embora distintos, ambos se baseiam no mesmo princípio: o espalhamento Compton.

III-5 Simulações com o MCNP - 4C

A montagem dos densímetros foi orientada pelos resultados obtidos nas simulações com o código Monte Carlo. O trabalho de programação inicial procurou estabelecer os parâmetros para as montagens da sonda. A **Figura 25** mostra o fluxo de fótons no volume do detetor obtido na programação para variações da espessura de chumbo da blindagem que evita que a radiação direta o atinja diretamente. A análise deste gráfico foi levada em conta na montagem da **Figura 11**. Aliás, a blindagem foi superdimensionada na montagem.

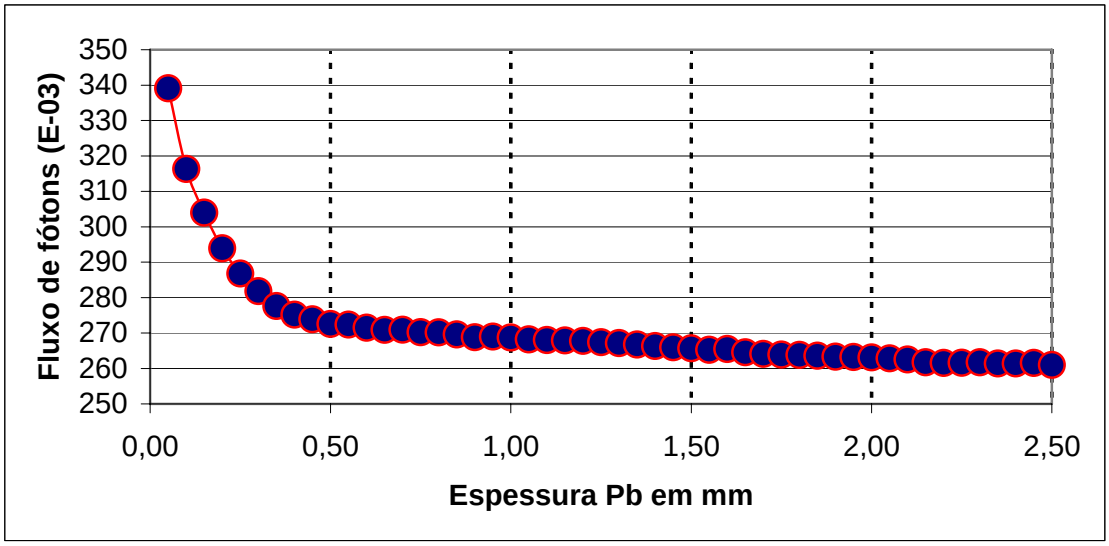

Figura 25. Resposta do MCNP-4C para variação do fluxo de fótons em função da espessura da blindagem de chumbo.

Pela **Figura 25**, a eficiência da blindagem se dá a partir de 0,50 mm. Deste ponto em diante, a diminuição do fluxo de fótons reduz seu ritmo. Como o programa trabalha com probabilidade, é possível prever que para este valor de blindagem a radiação direta

pode ser considerada desprezível. E assim permitir que somente a espalhada no meio atinja o detector. De qualquer maneira, a blindagem utilizada na prática foi de 1,0 cm.

Um outro fator estudado, capaz de influir na eficiência do densímetro foi a distância entre a fonte e a blindagem. Ela influi no ângulo sólido da radiação espalhada por efeito Compton que irá atingir o detector. Para grandes distâncias, o efeito da atenuação da radiação pela madeira diminui o fluxo. Para distâncias pequenas demais, ou seja, a fonte praticamente colada na blindagem, é a atenuação da blindagem que reduz consideravelmente este fluxo. A **Figura 26** mostra a resposta da programação neste estudo.

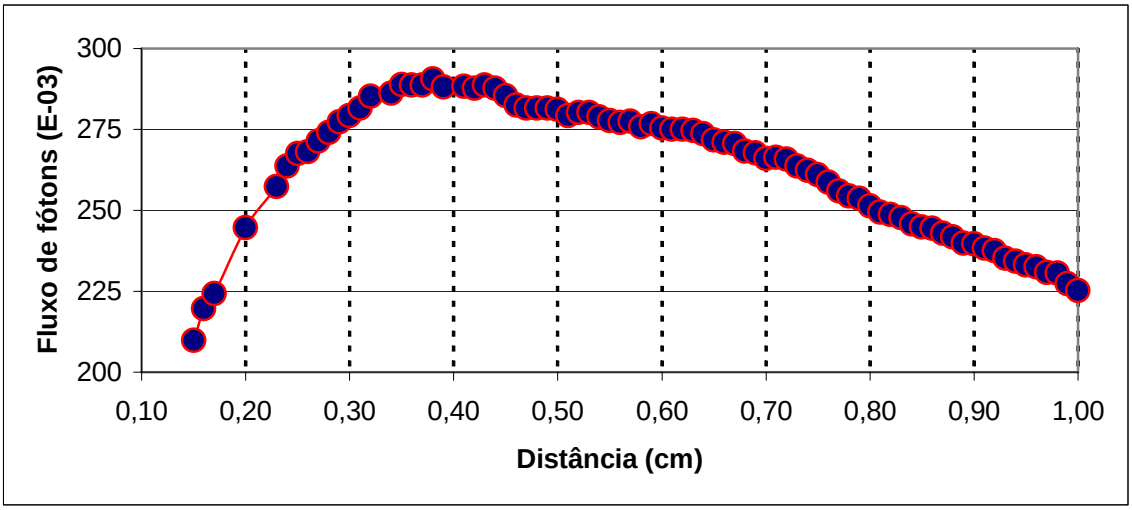

Figura 26. Resposta do MCNP-4C para variação do fluxo de fótons em função da distância entre a fonte de Amerício-241 e a blindagem de chumbo.

A análise do gráfico mostra a distância ótima para uma distância de 3,8 mm. Na prática, foi utilizado um espaçador (**Figura 11**).

Outra análise feita com o Monte Carlo diz respeito à dimensão da madeira. Caso a amostra fosse muito pequena, corria-se o risco de a radiação escapar da madeira sem que houvesse interação e conseqüente espalhamento. Desta forma, a detecção seria comprometida e os resultados imprecisos. Foram simuladas, já com a blindagem adequada e a fonte na posição ótima, variações no diâmetro da amostra. Os resultados são visíveis na **Figura 27**.

Pelos dados obtidos, as contagens atingem um patamar quando o raio da amostra supera os 7,5 cm. Isto pode ser interpretado como o raio de ação dos fótons de 60 keV provenientes da fonte de Amerício-241. Aumentos de diâmetro a partir deste patamar não irão mais influir nas medidas realizadas.

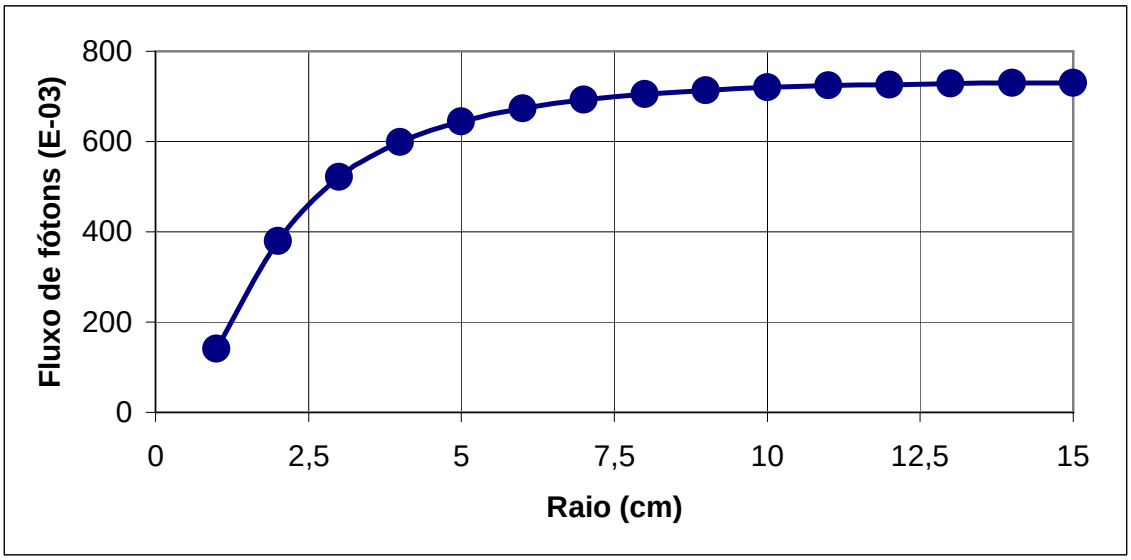

Figura 27. Variações no fluxo de fótons simulado pelo Monte Carlo em função da variação no raio da amostra de madeira.

As simulações dos densímetros, tanto para os bloquinhos de madeira quanto para a sonda introduzida na madeira mostraram que era possível se realizar as medidas, conforme foi confirmado nos experimentos posteriores. A primeira programação repete a geometria da **Figura 10**. Nela, os bloquinhos de madeira são atingidos pela radiação proveniente da fonte situada embaixo, sob os bloquinhos e no interior de uma blindagem de chumbo. O detector foi colocado lateralmente. A regressão dos dados obtidos está na **Figura 28**.

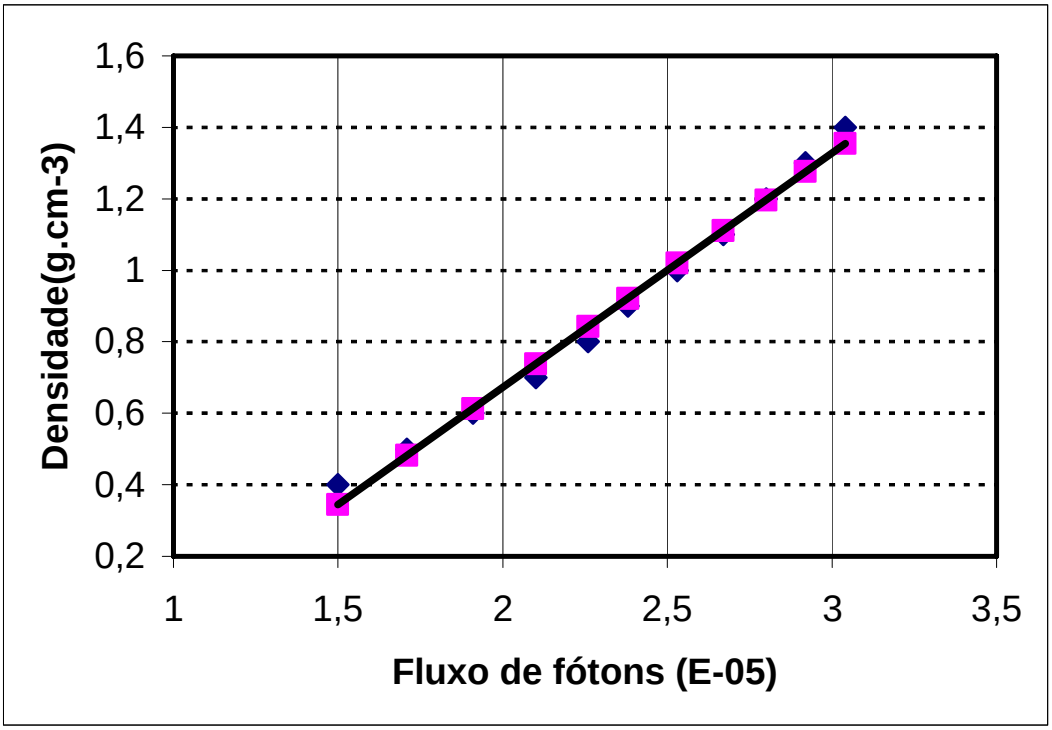

Figura 28. Gráfico da densidade *versus* fluxo de fótons previsto pelo MCNP-4C para o densímetro com fonte e detector externos.

O coeficiente de correlação foi 0,99 mostrando uma linearidade na relação densidade *verus* contagens. O Monte Carlo já previa o bom desempenho do densímetro montado.

Conforme já relatado, visando uma uniformidade nas amostras, foram feitos furos a 1,5 cm de distância das bordas dos troncos para a introdução da sonda do densímetro. Eles foram fotografados e representados na **Figura 9**. Para a situação mostrada, as simulações do Monte Carlo mostraram uma boa resposta para a variação do fluxo em função da variação da densidade, como se pode verificar na regressão da **Figura 29**.

Como nos outros casos também, inclusive como se pensava originalmente no início do trabalho. A idéia inicial era introduzir a fonte em um orifício centrado no meio da amostra. Mais tarde, com a chegada das amostras de madeira, preferiu-se padronizar fazendo o orifício a 1,5 cm da borda . O que indica uma versatilidade a mais no método. O coeficiente de correlação foi de 0,99.

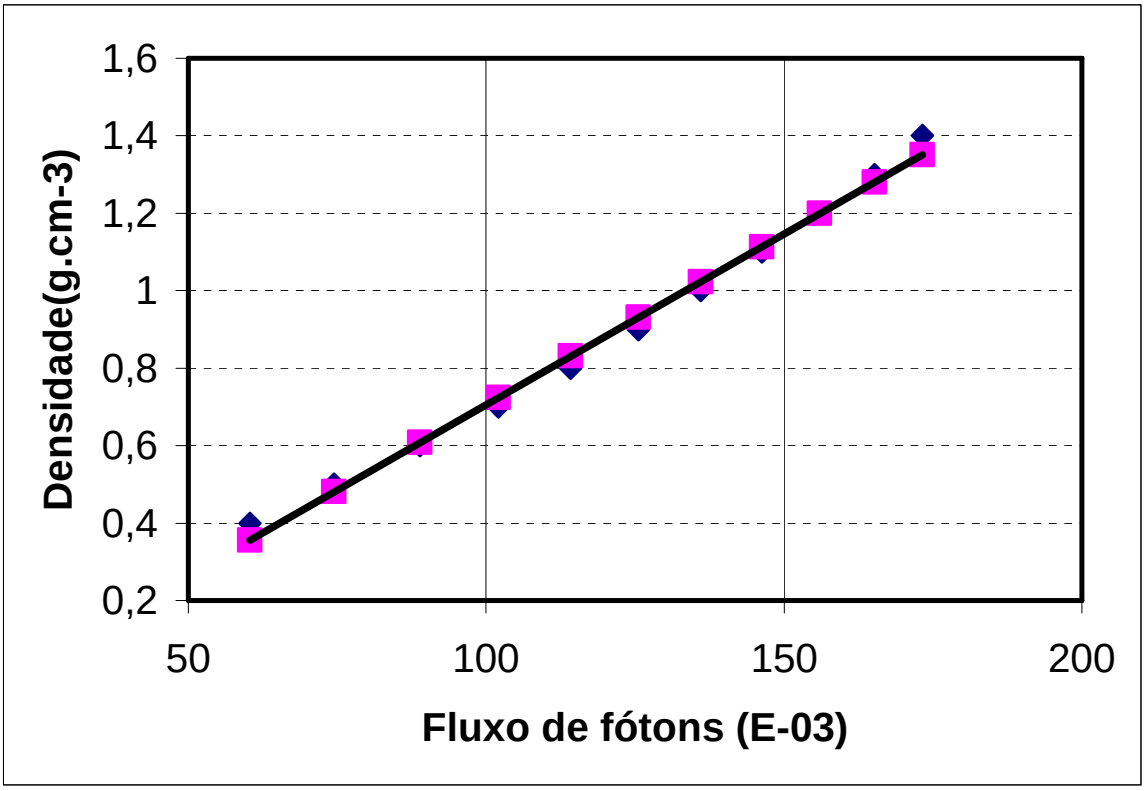

Figura 29. Gráfico da densidade *versus* fluxo de fótons para um densímetro nuclear de Amerício-241 com sonda introduzida na madeira a 1,5cm da borda.

III-6 Espectros

Os espectros obtidos durante os experimentos, tanto com a fonte externa como para sonda interna, foram plotados juntos na **Figura 30**, a título de comparação.

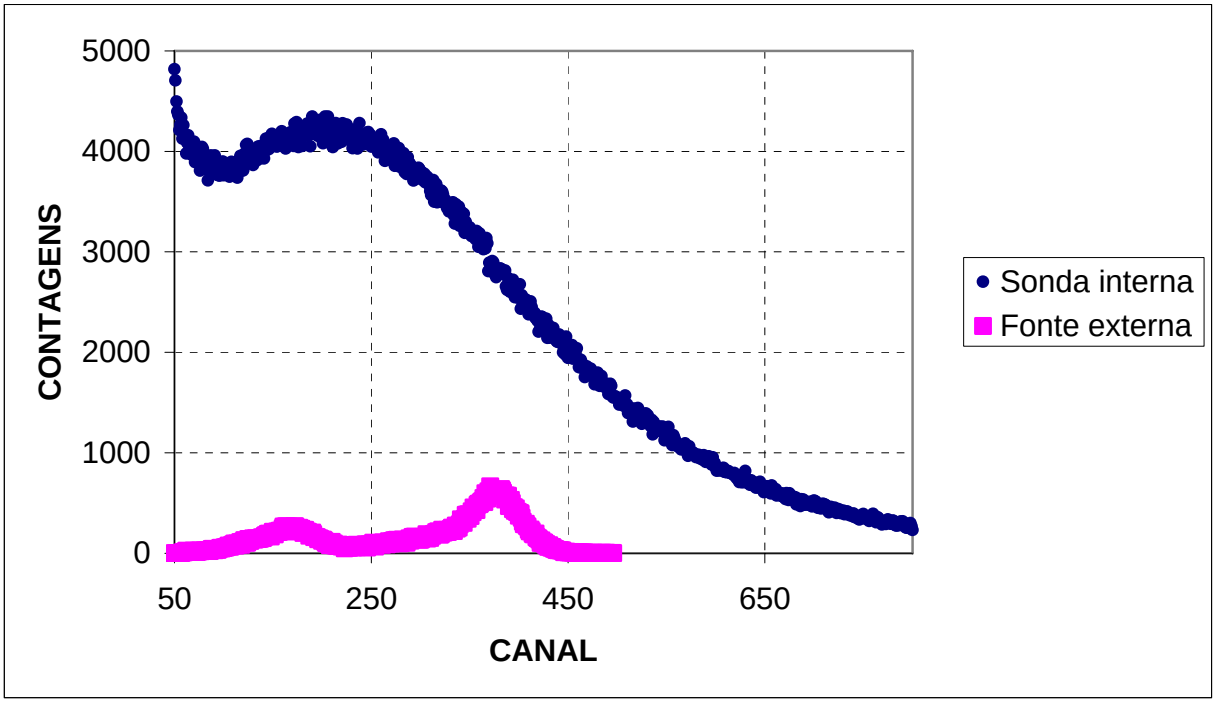

Figura 30. Espectros do Amerício-241 após espalhamento Compton na madeira, para o sistema com fonte externa e interna.

No caso do sistema com a fonte externa, como na **Figura 10**, o cintilador utilizado foi de NaI(Tl). Ficam visíveis o pico de 60 keV do Amerício e o pico de escape. Para o sistema com fonte interna, o cintilador utilizado foi o plástico, e a sonda contou com o guia líquido de luz (**Figura 12**). Neste caso, observa-se o deslocamento do pico de escape para a zona de ruído e mesmo visualmente a resolução não é boa no pico de 60 keV do Amerício, que diminui relativamente.

Isto se deve ao fato de que a presença do guia líquido, de 3 m de comprimento, deteriora os espectros. Os cintiladores plásticos são capazes de gerá-los, como se vê no trabalho de Silva, durante o desenvolvimento de outro tipo de sonda gama (2005).

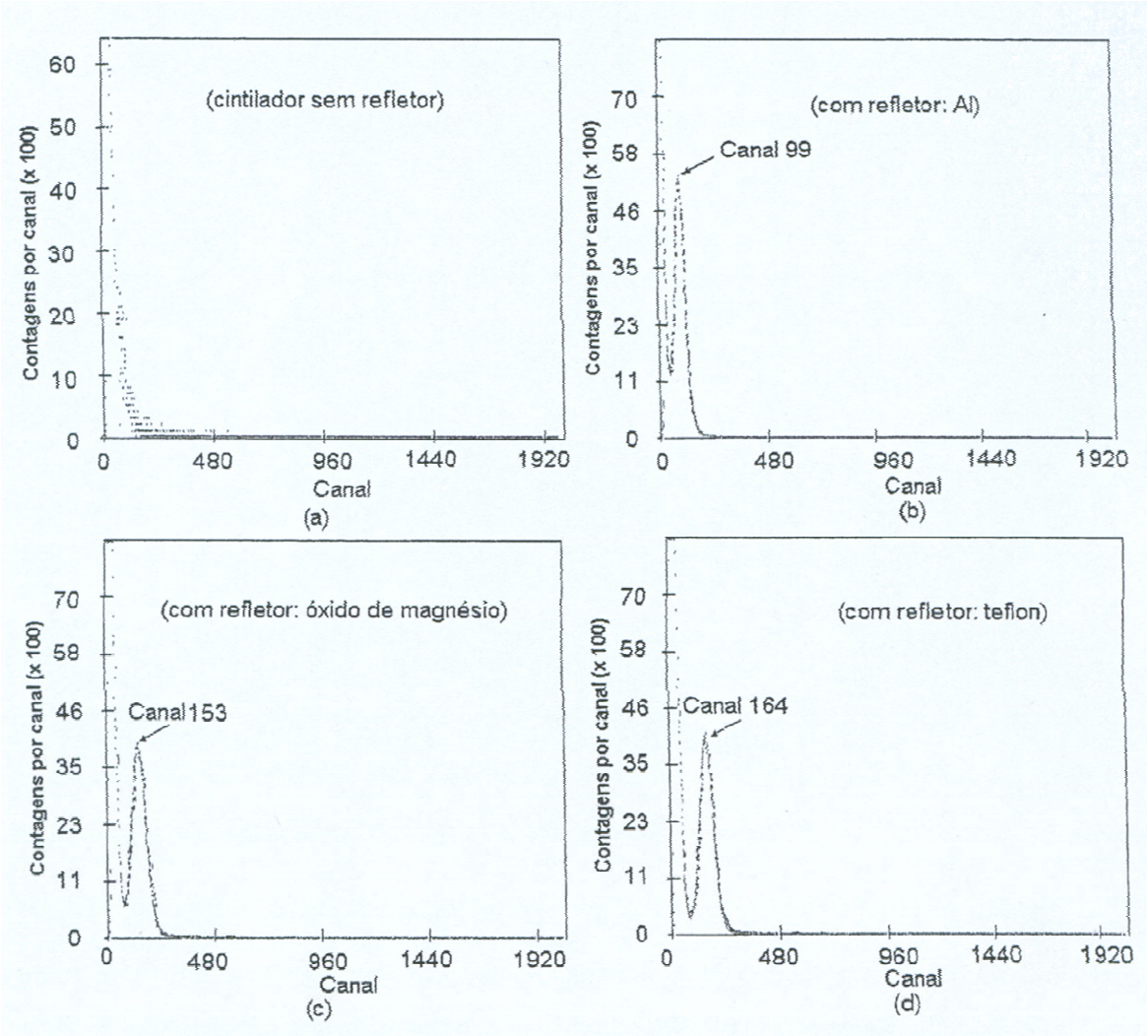

Figura 31. Espectros do Amerício-241 com cintilador plástico NE-102 sem revestimento (A), revestido com alumínio (B), com óxido de magnésio em pó (C) e com teflon (D) (Silva, 2005).

Porém, no trabalho de Silva, cujo revestimento avaliado como mais adequado para o cintilador plástico, o teflon, foi o mesmo utilizado neste trabalho, o cintilador plástico foi ligado diretamente à fotomultiplicadora para obtenção dos espectros. Sem, portanto, a influência do guia líquido.

Além do que, na determinação da densidade da madeira, o fator mais relevante é a eficiência nas contagens devidas ao espalhamento, ou seja, a área do fotopico, e não a resolução. Logo, este efeito de deterioração devido ao uso do guia não compromete as medidas.

Com o uso de outros tipos de detectores, isto para outras finalidades, é possível se obter espectros do Amerício-241 muito mais detalhados. Por exemplo, utilizando-se um detector de estado sólido, estes mais densos que os plásticos, do tipo Si(Li) ou outros, ficam visíveis linhas espectrais bem mais finas e mais detalhadas.

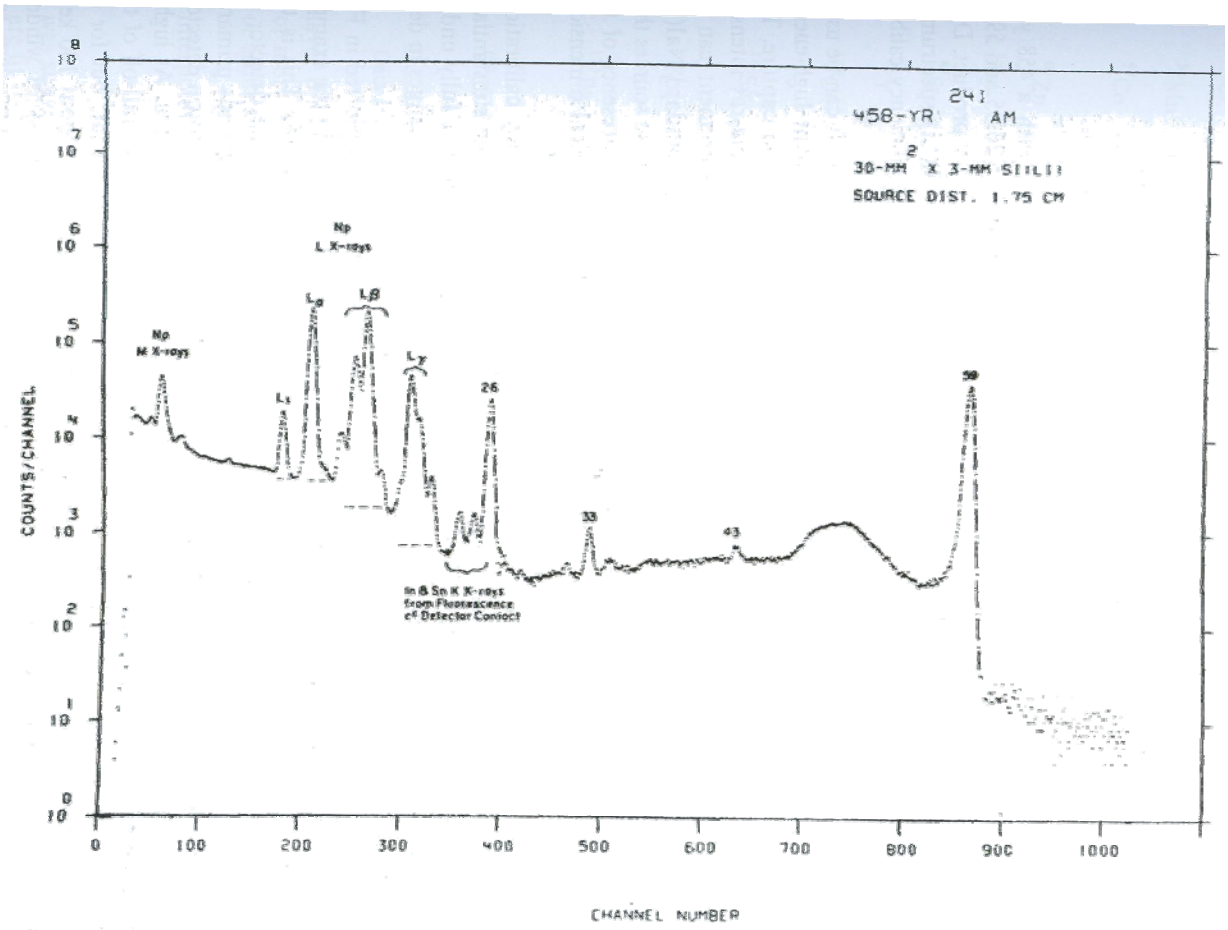

Figura 32. Espectro do ^{241}Am obtido com detector de Si(Li) de 30 mm^2 x 3 mm (Knoll, 1989).

IV. CONCLUSÕES

Levando-se em conta as pesquisas e experimentos realizados durante este trabalho, podemos apresentar as conclusões seguintes:

- os dois sistemas utilizados para medida de densidade por espalhamento Compton, tanto com fonte interna quanto externa à amostra, podem ser utilizados para medida da densidade da madeira;
- na faixa de densidade da madeira, de 0,4 a 1,4 $g.cm^{-3}$, o Amerício-241 de energia 60 keV é eficiente para medida de densidade;
- o código Monte Carlo, MCNP-4C, é uma ferramenta útil nas simulações e previsões para este tipo de densímetro. Sua utilização possibilita a construção de um sistema com geometria otimizada e mais eficiente;
- O sistema com a fonte interna pode ser utilizado furando-se diretamente no tronco da árvore e neste caso também pode ser considerado não destrutivo.

V. PERSPECTIVAS

Este trabalho cumpriu o objetivo de dar continuidade a outros já realizados no PCTN e abriu novas perspectivas de pesquisa. Além das pesquisas da utilização de guias líquidos na área de instrumentação nuclear, uma continuidade natural seria aprimorar o desenvolvimento das técnicas de medida de densidade da madeira, produto hoje de grande valor econômico. Entre as possibilidades concretas, algumas estão destacadas abaixo:

- Otimizar a geometria do sistema para que os dados de densidade possam ser obtidos com uma precisão maior. O método de Monte Carlo pode ser utilizado para se fazer as simulações necessárias com a eficiência já demonstrada neste trabalho.
- Pesquisar a utilização de técnica semelhante para medida da umidade da madeira e sua eventual influência na densidade. Novamente pode-se utilizar o Monte Carlo como ferramenta, pesquisando a programação necessária para simular a presença de água em uma amostra de madeira e como a umidade irá influenciar nas medidas de densidade.
- Aumentar a sensibilidade dos sistemas já em operação através de pesquisas que minimizem as perdas de fótons em todas as etapas de acoplamento do sistema.
- Pesquisar a construção de um densímetro mais compacto, com fonte de Amerício-241, que possa medir a densidade *in situ*. Isto de acordo com todas as normas e legislação vigente sobre Radioproteção.
- Registrar uma patente do sistema de medida de densidade.

VI. LITERATURA CONSULTADA

ABNT, A. B. D. N. T.-. NBR 11941 - Wood - Determination of basic density: ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941 2003.

Altkorn, R., I. Koev, R.P. Van Duyne, M. Litorja. Low-loss liquid-core optical fiber for low-refractive-index liquids: fabrication, characterizaation, and application in taman 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.

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

Beling, J. K., J. O. Newton, B. Rose. The Decay of Am241. Atomic Energy Research Stablishment. Harewell, Berkshire, England, 1952.

Bowyer, J. L. e R. L. Smith. The Nature of Wood and Wood Products. U. O. M. F. P. M. D. Institute 1998.

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

Coutinho, A. R. e E. S. B. Ferraz. Determinação da densidade do carvão vegetal por atenuação da radiação gama. IPEF. 39**:** 17-20 p. 1988.

Cown, D. e B. Clement. A wood densitometer using direct scanning with x-rays. Wood Science and Technology. 17**:** 91-99 p. 1983.

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.3167-2171. 1997.

Ferraz, E. S. D. B. Determinação da densidade de madeiras por atenuação de radiação gama de baixa energia. Boletim IPEF. 12**:** 61-68 p. 1976.

Ferreira, C. A. e E. S. B. Ferraz. Relatório de pesquisas apresentado à Comissão Nacional de Energia Nuclear. Esalq-Usp 1969.

Filho, M. T., L. E. C. Barrichelo, J. C. D. Costa. Análise da madeira de compressão em . *Pinus oocarpa* E *Pinus strobus* VAR. *chiapensis*. composição química. IPEF, v.31, 01/12/85, p.69-73. 1985.

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.

Haygreen, G. J. e J. L. Bowyer. Forest products and wood science: an introduction: Ames: Iowa State University Press, v.Specific gravity. Chapter 9. 1996

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

Laboratory, F. P. Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. 463 p.

Loss, W. E. Gamma ray absorption and wood moisture content and density. Forest Products Joumal, v.11, n.3, p.145-149. 1961.

MCT, M. D. C. E. T.-. Brasil: Campeão do Eucalipto 2005a.

_____. Eucaliptos mais resistentes, indústrias menos poluentes 2005b.

_____. Pesquisa de Campo: O Brasil tem hoje mais de três milhões de hectares de florestas de eucaliptos – a maior área do mundo. 2005c.

Palermo, G. P. D. M., J. V. D. F. Latorraca, M. A. D. Rezende, A. M. D. Nascimento, E. T. D. Severo, H. D. S. Abreu. Análise da densidade da madeira de Pinus elliottii Engelm. por meio de radiação gama de acordo com as direções estruturais (longitudinal e radial) e a idade de crescimento. Floresta e Ambiente. 10**:** 47-57 p. 2003.

Rebourgeard, P., F. Rondeaux, J. P. Baton, G. Besnard, H. Blumenfeld, M. Bourdinaud, J. Calvet, J. Cavan, R. Chipeaux, A. Giganon, J. Heitzmann, C. Jeanney, P. Micolon, M. Neveu, T. Pedrol, D. Pierrepont, J. Thevenin. Fabrication and Measurements of Plastic Scintillating Fibers. Nuclear Instruments & Methods v.427, n.3, p.543-567. 1999.

Reichardt, K. e C. A. Ferreira. Relatório de pesquisas apresentado à Comissão Nacional de Energia Nuclear. Esalq-Usp 1966.

Rezende, M. A. D., E. T. D. Severo, I. R. Quintana. Estudo das variações da massa específica em *Pinus oocarpa* através da técnica de atenuação da radiação gama. Floresta, v.29, n.1/2, p.67-84. 1999.

Silva, I. J. O. D. Desenvolvimento de Sonda Gama para Cirurgia Radioguiada. Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

Silva, M. R. D. S. Desenvolvimento de um Densímetro Nuclear por Difusão Compton utilizando um Guia Líquido de Luz. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

Speller, R. D., G. J. Royle, J. A. Harrocks. Instrumentation and techniques in bone density measurement. J. Phys. E: Sci. Instrum., v.22, n.4, p.202-214. 1989.

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.

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 Liquido de Luz. PCTN, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

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. Measuring the Vertical Density Profile In-situ During Pressing. November 1994, p.25. 1994.

Winistorfer, P. M. e W. W. Moschler. Dynamics of Mat Consolidation During Pressing: What We've Learned With Our In-press Radiation System for Pressing Wood Composites. SPIE Proceedings Series "Nondestructive Evaluation of Materials and Composites". December 1996, 1996. 324-334 p.

Www.Rofin.Com.

Zobel, B. J. e J. B. Jett. Genetics of Wood Production. Berlin, Heidelberg, New York, 1985. 337 p.

Zobel, B. J. e J. Talbert. Applied Forest Tree Improvement. New York. USA: John Wiley & Sons. 1984

APÊNDICE: PROGRAMAÇÃO DO MCNP-4C

Ao longo de todo este trabalho, o programa Monte Carlo se mostrou uma ferramenta útil em várias etapas. Caberia destacar sua utilização na otimização da montagem dos densímetros, particularmente com relação à espessura da blindagem, à posição da fonte de Amerício-241 em relação à blindagem, aos limites de detecção pelo densímetro e à própria funcionalidade dos mesmos. Toda a programação foi realizada seguindo-se as orientações do próprio manual de utilização do programa (Laboratory, 2000a). Assim como todos os materiais simulados nos experimentos utilizaram a base de dados, as bibliotecas de dados nucleares que acompanham o próprio programa (Laboratory, 2000b).

Com relação à madeira, foi feita uma programação aproximando sua composição como basicamente celulose, $(C_6H_{10}O_5)_n$, sendo o valor mínimo de n = 200 (Laboratory, 1999). E as amostras de madeira foram programadas no interior de uma esfera de ar, ambiente em que se realizou os experimentos, cujo raio foi de 40 cm.

Em todas as programações, o detector utilizado foi simulado como um cilindro preenchido com ar, cujas dimensões foram raio = 0,20 cm e altura = 2,00 cm no caso da simulação do cintilador plástico NE-102 e raio = 1,50 cm e altura = 1,00 cm no caso do cristal de NaI(Tl). Não foram feitas simulações para otimização do tamanho do cristal cintilador utilizado na detecção. Foi feita apenas a programação para a contagem dos fótons, espalhados por efeito Compton, que chegavam à região programada como o detector. Tampouco foi levada em conta a interação desta radiação com o material constituinte do detector, um cintilador plástico NE-102 ou de Iodeto de Sódio ativado com Tálio, utilizados na prática. O processo de interação nos cintiladores que geram os pulsos de luz processados e contados não foram objetos de estudo neste trabalho. A fonte de Amerício-241 foi programada como sendo puntual, emitindo uma radiação de energia igual a 60 keV.

Através dos parâmetros geométricos do programa, da definição de planos, cilindros e esferas, foram construídas as células de acordo com as geometrias de cada experimento

realizado. Estas células foram preenchidas com os materiais das bibliotecas de dados, chumbo, madeira, ar, de acordo com suas funções.

Para as simulações do densímetro, a geometria foi mantida constante, bem como a composição da madeira, variando-se somente o parâmetro densidade. Desta maneira foi possível o estudo da resposta teórica dos sistemas montados posteriormente. Programação semelhante já foi utilizada durante experimentos para medida de umidade, que se mostraram satisfatórios (Teixeira, 2005).

De forma semelhante, o código Monte Carlo vem sendo utilizado para muitos outros estudos nos quais a densidade é um parâmetro relevante (Mukhopadhyay & Nevada, 1996; Mcginley & Dhaba'an, 2000).

O número de fótons programados em cada simulação foi de 10.000.000, com erros relativos para as contagens diferentes de zero da ordem de 10^{-3}.

As plotagens dos experimentos foram arquivadas e conferidas. Na **Figura A1** está ilustrada a plotagem para a simulação do densímetro com fonte e cintilador externos.

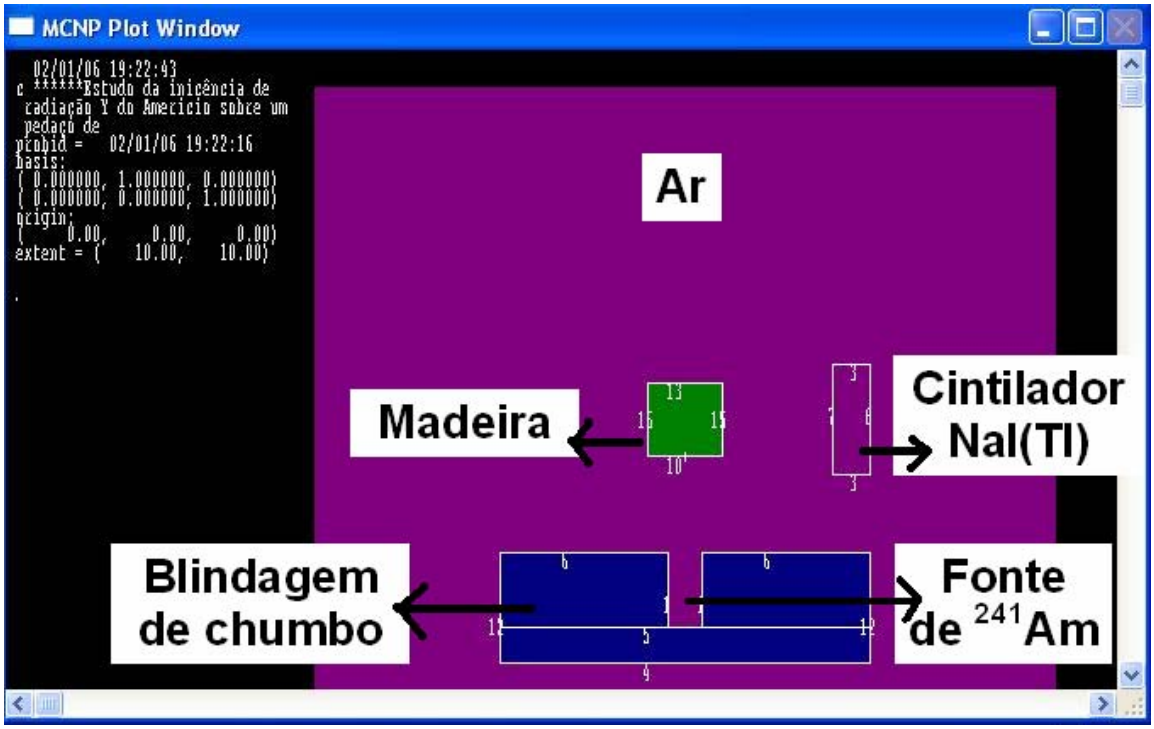

Figura A1. Plotagem do MCNP-4C da simulação do densímetro com fonte e cintilador externos.

A numeração na plotagem corresponde às superfícies definidas durante a programação. As diferentes cores correspondem aos diferentes materiais utilizados. As divisões entre os volumes em branco indicam que não houveram erros durante a programação destes volumes para constituírem as células.

APÊNDICE: PROGRAMAÇÃO DO MCNP-4C – LITERATURA CONSULTADA

Laboratory, F. P. Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. 463 p.

Laboratory, O. R. N. MCNP4C-Monte Carlo N-Particle Transport Code System. OAK RIDGE: RSICC-RADIATION SAFETY INFORMATION COMPUTATIONAL CENTER. 2000a. 898 p.

_____. MCNPDATA-Standard Neutron, Photon, and Electron Data Libraries for MCNP4C. OAK RIDGE: RSICC-RADIATION SAFETY INFORMATION COMPUTATIONAL CENTER. 2000b. 238 p.

Mcginley, P. H. e A. H. Dhaba'an. Evaluation of the contribution of capture gamma rays, x-ray leakage, and scatter to the photon dose at the maze door for a high energy medical electron accelerator using a Monte Carlo particle transport code. Medical Physics, v.27, n.1, p.225-230. 2000.

Mukhopadhyay, S. e B. Nevada. Plastic gamma sensors: an application in detection of radioisotopes. U. S. D. O. Energy: National Nuclear Security Administration Nevada Site Office**:** 11718-774 p. 1996.

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

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