

DETECÇÃO DE MINAS TERRESTRES POR RADIAÇÃO PENETRANTE

Wallace Vallory Nunes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Vergínia Reis Crispim, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Dr. Elmer Paz Alcon Quisbert, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2006

NUNES, WALLACE VALLORY

Dectecção de minas terrestres por
radiação penetrante. [Rio de Janeiro]
2006

IX, 112 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia Nuclear, 2006)

Tese - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Detecção de minas
2. Análise por ativação
3. MCNP
4. Redes Neurais

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e sabedoria concedida no desenvolvimento deste trabalho.

A professora Vergínia Reis Crispim pela confiança, dedicação e orientação diligente e segura empregada neste trabalho.

À minha querida esposa, Marcia Elane Teixeira Duarte Nunes, pelo amor, dedicação, compreensão e companhia durante o desenrolar deste trabalho.

Ao professor Ademir Xavier da Silva pela colaboração e acompanhamento nas simulações do MCNP.

Aos amigos José Cláudio Vitorelli da Silva e Kelling Cabral Souto, pelas sugestões e companheirismo demonstrados ao longo do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro recebido.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A meu pai,
minha mãe (*in memoriam*)
e minha esposa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DETECÇÃO DE MINAS TERRESTRES POR RADIAÇÃO PENETRANTE

Wallace Vallory Nunes

Dezembro/2005

Orientador: Vergínia Reis Crispim

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta um estudo da aplicação de redes neurais, algoritmo de inteligência artificial, utilizado na detecção de minas terrestres no reconhecimento de padrões de espectros característicos provenientes de sistemas simulados pelo o código MCNP utilizando a técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos. Após o treinamento da rede, foi possível determinar a presença da mina terrestre mesmo em comparação com outros materiais presentes no solo. O código MCNP pode ser utilizado para a simulação dos espectros produzidos pela irradiação de amostras, via método de Monte Carlo, para os diversos materiais ocultos no solo. As redes neurais comportaram-se como um poderoso algoritmo capaz de reconhecer o padrão da mina. Além disso, a rede foi capaz de generalizar, identificando a presença da mina terrestre em casos onde não havia sido treinada. Dessa forma, revelou-se como excelente ferramenta a ser aplicada em sistemas de inspeção *in loco*.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

LANDMINE DETECTION BY PENETRATING RADIATION

Wallace Vallory Nunes

December/2005

Advisors: Verginia Reis Crispim

Department: Nuclear Engineering

This work describes a study of application of neural networks, artificial intelligence algorithm, used to detecting of the presence of buried landmine by prompt gamma neutron activation (PGNAA) system, using the characteristic spectra of the substances as patterns which were simulated by MCNP code. After the training of the neural networks, it was possible to determine the presence of TNT landmine in comparison with other materials in soil. The MCNP code can be used for the simulation of the spectra produced by the irradiation of the samples, through the Monte Carlo, for the several materials occludes in soil. The neural networks, behaved as a powerful algorithm capable to recognize the patterns of landmines spectra. Besides that, the network is capable to generalize, identifying the presence of explosives in cases where it had not been training. In that way, it was revealed as a excellent tool to be applied in inspections in loco systems.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
I.1 - Principais características das minas.....	5
I.2 - O processo da retirada da mina.....	6
I.3 – Detecção de minas.....	7
I.3.1 – Métodos clássicos de detecção	7
I.3.2 - Técnicas de detecção não-nucleares mais empregadas.....	9
I.3.3. Técnicas utilizando radiação penetrante.....	11
(i) <i>Fótons</i>	13
(ii) <i>Nêutrons</i>	15
I.4 – Objetivo do trabalho.....	21

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
II.1 – A Interação de Nêutrons com a Matéria.....	23
II.1.1 – Fontes de Nêutrons.....	26
II.1.1 – Moderação.....	28
II.1.3 – Blindagem.....	29
II.2 – Análise por Ativação com Nêutrons Térmicos.....	29
II.3 – O Método de Monte Carlo.....	31
II.3.1 – O Código MCNP.....	31

II.4 – Redes Neurais.....	33
II.4.1 – Algoritmo de Retropropagação.....	35
II.4.2 – O Código NeuroShell 2.0.....	39
CAPÍTULO III	
METODOLOGIA.....	43
III.1 – Otimização do fluxo de nêutrons térmicos no explosivo pelo MCNP4B....	46
III.2 – Geração de fótons simulados pelo MCNP4B.....	47
III.3 – Aplicação das Redes Neurais na Interpretação dos Dados Simulados.....	50
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS.....	52
IV.1 – Modelagem de sistemas ideais.....	52
IV.2 – Modelagem de um sistema semelhante ao real.....	62
IV.3 – Aplicação de Redes Neurais na Interpretação dos Espectros Simulados.....	68
IV.3.1 – Sistema ideal.....	69
IV.3.2 – Sistema semelhante ao real.....	71
CAPÍTULO V	
CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

APÊNDICE A	90
APÊNDICE B	91
APÊNDICE C	93

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Desde a queda do vôo da Pan Am em 1988, Lockerbie, Escócia, as ameaças terroristas, intensificadas com a queda das Torres Gêmeas em Nova Iorque, a partir de 11 de setembro de 2001, têm causado grande preocupação à segurança pública. Por isso, não se tem poupado esforços no sentido de se pesquisar métodos de detecção de explosivos. Ao longo dos últimos anos, milhões de dólares por ano têm sido gastos no desenvolvimento de novas tecnologias (GAO/NSLAD, 1996). Maiores informações sobre a detecção de explosivos em bagagens de passageiros estão disponíveis em NUNES, W., 2002.

A segurança de aeronaves não é o único desafio para garantir a proteção da população civil; em todo mundo, inúmeras minas terrestres fazem centenas de vítimas, a cada ano. Elas se encontram enterradas logo abaixo da superfície e ameaçam um grande número de crianças e adultos, como no caso de Angola, que possui cerca de 20 milhões de minas terrestres em seu solo e, por isso, possui a maior população mundial de amputados (SAKAMOTO, L., 1999). Além disso, estima-se que o número de minas atinja a marca de 110 milhões, num crescimento de dois milhões por ano, espalhadas em 64 países (COUSINS, T. *et al.*, 1998). Contudo, os detectores atuais não são eficientes o suficiente

para encontrar pequenas minas antipessoas, compostas, inclusive, de explosivo plástico (Anon. 2001).

O fato central sobre minas que sobrepõe a qualquer outro é o ferimento produzido na vítima. Uma pessoa (adulto ou criança), ao caminhar tranqüilamente em um campo, de repente, está sujeita a ter seu corpo despedaçado ou, no melhor dos casos, consegue sobreviver, mas mutilado.

As 110 milhões de minas espalhadas pelo mundo inteiro encontram-se sobretudo nos países mais pobres e do terceiro mundo. Alguns podem dizer que tais estatísticas se tratam apenas de suposições e não retratam fielmente a realidade. Na verdade, é possível estimar os custos para desminagem e para os cuidados médicos, mas nenhuma estatística mudaria o fato central do ferimento causado por uma mina, tais como: amputações freqüentes, grandes desabilidades e traumas psicológicos. Mesmo que a vítima não faleça, as seqüelas são trágicas e estima-se que um adulto necessite de uma nova prótese, a cada 5 anos, sem atentar para o fato de que o UNICEF estima que 30 a 40% de todas as vítimas de minas têm menos do que 15 anos de idade.

Numa reflexão simplória, pode-se pensar sobre quantas pessoas morrem numa guerra devido à ação de inúmeros tipos de armas diferentes. Num panorama onde armas químicas e biológicas estão em voga, porque se preocupar com minas? A atenção dada às minas encontra-se no fato de que estas armas são diferentes. Minas terrestres não discriminam civis ou soldados. Além disso, as minas ficam ativas por décadas, mesmo após muitos anos em que os conflitos foram estabelecidos ou se transferiram para outras áreas. Na Polônia, por exemplo, 30 anos depois do fim da Segunda Guerra Mundial, minas localizadas na serra mataram 4.000 pessoas e feriram 9.000 e isso aconteceu, apesar da retirada de 15 milhões de minas (ICRC, 1996).

Ao redor do mundo, alguém, em algum lugar, é ferido por uma mina a cada 20 minutos. Aproximadamente, 2.000 pessoas são atingidas por mês. Dessas, em torno da metade morrerão imediatamente ou suas vidas se esvairão em campos isolados.

Se as guerras fossem conduzidas conforme o que rege a Convenção de Genebra, o ferimento e o assassinato dos civis não aconteceriam. Entretanto, como as regras são ignoradas, as minas anti-pessoa estão presentes, na maioria dos conflitos mundiais recentes, e custam entre US\$3 e US\$30, sendo usadas também pelo pânico que causam nas pessoas.

Minas terrestres, desde a primeira guerra mundial, provaram ser armas militares eficazes. Negam o acesso ao inimigo às áreas e podem dificultar, atrasar e/ou destruir as forças inimigas. Podem também causar incômodo, interrompendo as linhas de suprimento, desmoralizando e enfraquecendo psicologicamente o oponente. As minas antitanque interrompem o tráfego veicular, enquanto que as minas antipessoa defendem áreas e negam o acesso às pontes e aos outros recursos. Sob algumas circunstâncias, as minas terrestres são usadas para controlar o movimento militar e civil através das fronteiras. Na guerrilha e em guerras civis, as minas terrestres são usadas para interromper o comércio, instalar o medo entre não-combatentes, como uma arma psicológica que mina a confiança no governo local, e serve como armadilha. Embora as minas terrestres sejam vistas como armas eficazes e baratas, representam uma ameaça à segurança pública, isto é, aos civis inocentes. Elas minam a paz e a estabilidade e deixam para atrás indivíduos aleijados que requerem o cuidado de saúde continuado e podem deixar de ser membros inteiramente produtivos da sociedade. Aproximadamente, 26000 pessoas são mortas ou mutiladas, a cada ano, por minas terrestres. Por exemplo, em Angola, um de cada 334 indivíduos, foi amputado por minas terrestres; no Camboja, há um número superior a 25000 amputados devido às

explosões de minas. Cerca de 22 milhões de pessoas no mundo são impedidas do retorno à normalidade por causa de minas terrestres.

Em muitas situações, as minas foram usadas intencionalmente para conter o trânsito de pessoas e realmente matar a população. Em situações de guerra, a população costuma sair de suas cidades ou vilas em busca de água, comida ou de um local mais apropriado para o plantio. No intuito de impedir que as pessoas usufruam desses locais estratégicos, normalmente, as forças armadas os cercavam com minas.

Visando a diminuição dos efeitos trágicos causados pelo emprego de minas terrestres, em Maputo, capital da Angola, 137 países assinaram o Tratado da Proibição do Uso, Estoque, Produção e Transporte de Minas e da sua Destruição, em março de 1999. O Brasil assinou o tratado de Proibição de minas, em 3 de dezembro de 1997, e ratificou-o, em 5 de agosto de 1999, pelo decreto 3.128, porém, os principais produtores e exportadores de minas (Estados Unidos, Rússia e China) não assinaram o tratado.

Entre os anos de 1969 a 1992, somente os Estados Unidos exportaram 4,4 milhões de minas antipessoa. Cerca de 47 empresas americanas estão envolvidas com a manufatura de minas e apenas 19 delas aceitam reduzir a produção.

Segundo Hussein e Waller (Hussein e Waller 2000), o processo de detecção é conduzido, geralmente, em dois estágios: primeiro, numa escala mais abrangente, para encontrar um potencial campo minado e elementos similares às minas na terra, e em segundo, para determinar localmente às minas e alvos semelhantes. Ambas, a busca global e local, apresentam desafios às tecnologias de detecção. A busca global deve ser rápida e objetiva para alvos similares enterrados, ao passo que a busca local deve ser exata na detecção de minas terrestres ou, mais precisamente, explosivos, enterrados. A seguir, serão apresentados os problemas que envolvem esse tipo de detecção, causados pela variedade das

minas, pela dificuldade de detecção e do terreno, frente à tecnologias locais de detecção de minas terrestres. Serão apresentados também os métodos apropriados para a detecção da mina, utilizando-se radiação e como eles podem contribuir para o bem-estar da humanidade.

Mesmo que a produção de minas diminua ao extremo, ainda restarão inúmeras minas enterradas. E, diante dos grandes malefícios encontrados pelo terrorismo internacional e pelo grande número de minas subterrâneas espalhadas no solo de diversos países, afetando sobretudo a população civil, faz-se necessária a elaboração de mecanismos eficazes para a detecção desses explosivos. Entretanto, neste trabalho, focalizar-se-á a detecção de minas terrestres.

I.1 – Principais características das minas

As minas antitanque e antipessoa apresentam-se com formas e tamanhos diversos podendo ser revestidas com metal, plástico, madeira ou com uma combinação desses materiais. Seu mecanismo de detonação varia desde os com gatilhos simples de pressão, acionados ao se tropeçar em fios, inclinando as hastes ligadas ao fio, até os detonadores acústicos e sísmicos, ou mesmo aqueles acionados à luz ou magneticamente influenciados. Podem ser colocadas em um campo com vários materiais e objetos, desordenadamente, enterradas em diversas profundidades, espalhadas na superfície, plantadas dentro de construções, ou cobertas pela vegetação rasteira.

As minas antitanque ou antiveicular têm freqüentemente a forma cilíndrica ou de um paralelepípedo com vértices arredondados, com maior dimensão entre 15 e 30 centímetros e uma espessura entre 5 e 9 centímetros (HUMANITARIAN DEMINING, 2001). O material

explosivo é tipicamente TNT ($C_7H_5N_3O_6$). São enterrados em várias profundidades desde rente à superfície até 25 cm (MAUCEC E MEIJER, 2001).

I.2 - O processo de retirada da mina

As exigências da desminagem (retirada da mina) civil são completamente diferentes daquelas da desminagem militar e isso afeta o problema da detecção. Durante uma operação militar, o objetivo é atravessar tão rapidamente um campo minado quanto possível, freqüentemente usando a força bruta. A operação desminagem envolve então a identificação de um campo minado e sua travessia usando cargas explosivas, máquinas semelhantes à colheitadeiras, rolos compressores, arados ou ancinhos. O objetivo é traçar um caminho para a travessia, com um veículo tão longo quanto necessário, com vítimas limitadas. Freqüentemente, algumas minas são ignoradas à esquerda ou à direita desse caminho aberto para a travessia da tropa, resultando posteriormente, num problema de segurança para a população que passe por ali. Nas batalhas, um campo minado pode também ser marcado e evitado. Nas forças armadas, a desminagem não é concebida como um problema que dificulta ou atrasa tanto a progressão da tropa. A desminagem civil, por outro lado, é mais difícil e perigosa do que desminagem militar, porque requer a remoção completa de todas as minas. O tráfego e o uso de campos devem ser restabelecidos e, em consequência, nenhum material explosivo pode deixar de ser removido. A limpeza das estradas ou dos campos minados, conhecida como operação de aprovação ou certificação, é essencial para reconstruir a confiança pública. Esse processo envolve a detecção e a remoção de todas as minas que puderem permanecer após uma desminagem preliminar. As minas que permaneceram, indetectáveis na primeira fase da desminagem, são

provavelmente aquelas que foram enterradas mais profundamente, podendo causar problemas futuros se não forem detectadas. Isso torna o processo da detecção mais desafiador, carecendo de uma tecnologia especial de detecção e de certificação.

I.3 – Detecção de Minas

I.3.1 - Métodos clássicos de detecção

Destaca-se quatro técnicas primitivas de detecção de minas que são largamente utilizadas e apresenta-se suas limitações.

- (i) *Inspeção visual simples.* Na inspeção visual, observa-se a sujeira, minas aparentes, etc. Embora seja um método de identificação de objetos, a familiaridade com o formato das minas terrestres pode ajudar a identificar o objeto como suspeito de conter uma carga explosiva. As limitações de uma inspeção visual superficial são óbvias.

(ii) *Detectores manuais de metal.* Os detectores de metal tentam obter a informação da presença de minas terrestres aplicando-se um campo magnético variável no tempo sobre o solo, que induz uma corrente em objetos metálicos; tornando-se, dessa feita, num campo magnético detectável. Entretanto, as minas terrestres podem tanto conter um pouco de metal, no pino do detonador, como não. Aumentar a sensibilidade de um detector de metal em função de uma pequena quantidade de metal torna-o muito suscetível à influência dos fragmentos metálicos que são encontrados normalmente em muitas áreas afetadas. Embora o uso de pulsos de conformação de onda e a monitoração de emissões multi-freqüência possam melhorar a potencialidade das sondas de indução eletromagnéticas, estas continuam

não sendo apropriadas para o uso em solos magnéticos e pesadamente mineralizados. Os detectores de metal, quando em bom funcionamento, podem somente identificar a presença de objetos metálicos enterrados, sem identificar um material explosivo.

(iii) *Instrumentos clássicos de desminagem.* Os instrumentos de desminagem permitem a inspeção subsuperficial, empregando baionetas ou pontas de sondas (aproximadamente 250 milímetros de comprimento) para esquadrihar a terra, centímetro por centímetro, a fim de se detectar a presença de um objeto (contínuo) duro no solo. Esta é, conseqüentemente, uma outra técnica da identificação de objetos que não fornece nenhuma informação sobre a característica do material. A sondagem deve ser feita em um determinado ângulo cuidando-se para evitar a detonação, já que o detonador preliminar encontra-se, geralmente, na parte superior da mina, que ao ser levantada, pode causar a explosão. Mais uma vez, o método primitivo não distingue as minas terrestres de qualquer outro objeto contínuo que puder estar no solo, tal como uma rocha, tornando perigosas as inspeções.

(iv) *Animais adestrados.* Os cães têm em seu olfato um dos sentidos mais apurados, quando comparados aos seres humanos, especialmente para farejar pistas, podendo ser treinados também para detectar a presença dos explosivos. Este é, de fato, um processo material da caracterização, porque os cães farejam os vapores emanados do material explosivo, mas requer, um o treinamento ostensivo. Os cães têm tempo de vida curto (em torno de dez anos), o que dificulta a continuidade da operação. Outro animal utilizado para detecção de minas é a abelha. Utilizam-se sensores de localização presos no dorso desses pequenos animais, porém, diferentemente dos cães, as abelhas vivem pouco tempo, cerca de 30 a 90 dias, o que também inviabiliza a continuidade da operação. Como simuladores de farejadores existem tubos aspiradores baseados em processos químicos que podem

também ser usados, embora não sejam tão sofisticados, quanto os cães e as abelhas, em relação às suas habilidades de mobilidade e detecção. Além disso, os campos minados são geralmente saturados com emissões residuais de vapores dos explosivos recentemente detonados, o que pode contribuir para a desordem química da área, os sentidos dos animais. O esforço total de detecção por alguns dos meios acima descritos é cansativo e requer a disciplina e bom treinamento de pessoal. Isso motivou o investimento internacional em mecanismos remotos de detecção.

I.3.2. Técnicas de detecção não-nucleares mais empregadas

Um número de técnicas de detecção de minas estão surgindo como alternativas aos métodos usados atualmente que não se modificaram, desde a segunda guerra mundial. A técnica de detecção por câmeras infravermelhas baseia-se na diferença na capacitância térmica entre o solo e a mina afeta suas taxas de aquecimento/resfriamento e, conseqüentemente, suas emissões infravermelhas associadas. As câmeras infravermelhas são usadas para mapear com testes padrões a irradiação do calor provindo da terra, que, não obstante, faz a desse método termográfico uma técnica de identificação por semelhança (Ashley, 1996). A técnica mede a emissão térmica da terra e interpreta as mudanças ocorridas nessa emissão como decorrentes da presença de um objeto estranho; conseqüentemente, também não fornece informação das características do material. Entretanto, tem a vantagem de ser passiva, podendo ser executada remotamente, por busca aérea, podendo cobrir uma área grande, em curto tempo. A termografia infravermelha é o melhor método de identificação de campos minados (busca global de uma área), melhor do que procurar minas individuais (busca local de uma área). Entretanto, quando o solo e as

minas estão em equilíbrio térmico, sua aplicação é limitada durante o por do sol ou no nascer do sol, quando um gradiente de temperatura ocorre na superfície da terra.

A diferença na reflexão e na polarização do solo, quando perturbado pela energia de um raio laser pode ser usada para identificar a presença de objetos enterrados no solo (Ashley, 1996), mas requer grande potência, uma interpretação complexa dos dados e também não fornece as características do material. Como a corrente induzida pode ser gerada somente em materiais condutores, tais como metais, e microondas são refletidas pelas superfícies metálicas, as minas revestidas com metal podem ser detectadas por detectores metálicos de pulso-indução e por microondas (radares penetrantes na terra). Infelizmente, nem todas as minas são metálicas. Não obstante, as microondas são espalhadas também, numa pequena extensão, por objetos não metálicos e as assinaturas características dessa reflexão podem ser relacionadas ao tipo de material, sendo assim, podem ser usadas para identificar os explosivos. Entretanto, limitações significativas são esperadas em decorrência das perdas de propagação no solo; do baixo contraste entre o alvo e o solo; da grande variedade dos ecos da superfície áspera e de outros contrastes rasos, tais como rochas, raízes da árvore, etc. (Peters et. al., 1994). Uma discriminação entre a mina e o que a circunda, diante da grande variedade de condições da superfície e do solo, permanece muito difícil de ser obtida (Peters et. al., 1994). Além disso, a água tem uma alta afinidade de absorção de microondas, tornando o sistema difícil de se operar em solos úmidos. Trata-se de um método de identificação do corpo, sem capacidade de caracterizar o material.

Apesar dos métodos citados não informarem as características do material suspeito, a experiência e a familiaridade com esses métodos permitirão reduzir a taxa de avaliação falso-positiva de detecção sobre os objetos inofensivos. Entretanto, como um erro nessa

avaliação pode ser fatal, dever-se-ia tratar cada objeto identificado como sendo uma mina e remove-lo como se assim o fosse, o que torna a tarefa muito cansativa e dispendiosa. Assim, deseja-se ter um método que caracterize o material inspecionado, de forma a se determinar se o objeto identificado contém um material explosivo ou não. Assim sendo, as técnicas empregando a interação de radiações penetrantes com a matéria podem ser adequadas ao propósito.

I.3.3. Técnicas utilizando radiação penetrante

As radiações penetrantes (nêutrons e fótons) oferecem algumas características atrativas que podem ser utilizadas na detecção de minas terrestres, particularmente na caracterização do material. Entretanto, ao contrário dos métodos radiográficos ou tomográficos convencionais, faz-se necessário um método que não utilize a transmissão da radiação, porque requer o acesso a dois lados opostos ao redor da amostra; uma situação que não é aplicável na detecção de minas terrestres. Conseqüentemente, depende das emissões secundárias da radiação (ativação) ou espalhamento dessa radiação. A principal contribuição do emprego da radiação penetrante na detecção de minas terrestres, apesar das exigências de proteção radiológica, está no fato de que ela deve fornecer a informação característica do material. Por conseqüência faz-se necessário pesquisar sobre a composição real dos materiais explosivos.

O material explosivo mais provável encontrado em minas terrestres é o TNT; embora o RDX e outros explosivos plásticos sejam usados também (Ashley, 1996). Esses explosivos são ricos em nitrogênio, que serve como um agente de ligação. Entretanto, a quantidade de nitrogênio sozinho não é suficiente para diferenciar definitivamente um

material explosivo de outros materiais inofensivos (Hussein, 1992). Os explosivos são ricos em oxigênio (agente de oxidação). Portanto, a relação entre a taxa de nitrogênio e a taxa de oxigênio fornece um identificador do material explosivo (Hussein, 1992). O hidrogênio e o carbono estão presentes na maioria dos explosivos e podem ser usados para caracterizar uma anomalia detectada como a presença de um material explosivo. Porém, a detecção do hidrogênio e do carbono apenas não é um indicador suficiente para se definir um material explosivo quanto aquele de detecção de nitrogênio e o oxigênio.

A composição do solo no qual as minas terrestres são colocadas varia da areia seca ao solo úmido e fértil. Entretanto, a crosta terrestre é constituída principalmente de oito elementos básicos: oxigênio (49,52%), silício (25,75%), alumínio (7,51%), ferro (4,7%), cálcio (3,39%), sódio (2,64%), potássio (2,40%) e magnésio (1,94%), quando todos elementos restantes constituírem aproximadamente 2,15% de seu peso (Christopher, 1981). Assim, o único elemento comum à crosta terrestre e ao material explosivo é o oxigênio. Entretanto, outros objetos, tais como a vegetação (por exemplo, raízes) e a sucata plástica, podem também estar enterrados no solo. Estes e outros materiais com hidrocarbonetos contêm elementos químicos similares àqueles encontrados nos explosivos, podendo confundir o processo de caracterização do material.

Algumas das ambigüidades na indicação da composição podem ser reduzidas pelo fato de que os explosivos têm uma densidade mais elevada do que a maioria dos materiais orgânicos comuns e menor do que a dos metais e a dos muitos tipos de solo (Hussein, de 1992). Logo, a combinação das informações elementares sobre a composição e a densidade do material pode ser útil para fornecer a caracterização definitiva de um corpo suspeito de conter um material explosivo (Tang e Hussein, 2004). Seguindo esse raciocínio, o uso de fótons e de nêutrons na detecção serão avaliados, permitirá concluir-se se o objeto

identificado contem um material explosivo ou não. Outras técnicas, discutidas acima, servem mais para identificar corpos semelhantes às minas.

(i) Fótons

A utilização de fótons (raios X ou γ) na detecção de minas terrestres se destina à análise do espalhamento ou das emissões secundárias dessas radiações. Os fótons também podem ser emitidos como resultado de uma ativação neutrônica, o que será discutido na próxima seção. Entretanto, a absorção de fótons incidentes pode conduzir à geração de raios X característicos (fotopico), devido ao rearranjo dos elétrons na nuvem eletrônica do átomo, sendo geralmente reabsorvidos no meio. A radiação de bremsstrahlung é uma emissão secundária, tendo maior probabilidade de ocorrência em interações com materiais de alto número atômico (Z), como alguns abundantes no solo, não sendo esperada a interação com os componentes dos explosivos. A terceira reação esperada ocorre com fótons, levando à emissão secundária é a de produção de pares, em que o par do elétron pósitron, dá origem ao processo de aniquilação, gerando dois fótons de 511 keV. Ela é predominante em altas energias (acima de aproximadamente 4 MeV) e para elementos pesados. A desvantagem desta reação é que ela requer a presença de elementos pesados que não são abundantes no solo e nas minas. Além disso, os fótons de alta energia são obtidos por aceleradores caros que, em condições de campo, não são portáteis e que requerem a habilidade e cuidados especiais durante a operação. Em resumo, nenhuma emissão significativa pode ser esperada das interações dos fótons com a matéria e, mesmo quando

tais emissões ocorrem, provavelmente, resultam das interações com elementos de elevado número atômico, que não são encontrados em materiais explosivos.

A segunda maneira de se empregar fótons no processo da detecção de minas terrestres, excluindo a transmissão, é pelo espalhamento dessa radiação (Hussein, E., Desrosiers, M. e Waller, E., 2005). O espalhamento do fóton pode ocorrer, coerente ou incoerentemente, com os elétrons da matéria. O espalhamento coerente ocorre para desvios angulares pequenos e, conseqüentemente, como a transmissão, requer o acesso a ambos os lados de um objeto analisado. Logo, essa não é uma reação que poderia ser empregada para o problema de inspeção unilateral da detecção de minas terrestres. Por outro lado, o espalhamento Compton é dominante na maioria dos materiais e predominante nas energias intermediárias. Os fótons incoerentes (espalhamento Compton) interagem com os elétrons dos átomos com uma probabilidade dependente da densidade eletrônica, e da densidade de massa, do meio. Conseqüentemente, o espalhamento Compton pode fornecer um mapa da densidade, que pode ser usado como um indicador para um objeto suspeito que tenha uma densidade na escala de materiais explosivos (Tang e Hussein, 2004). Esta é a essência do sistema do retro-espalhamento de raios-X de Campbell e de Jacobs (1992). Os raios gama podem também fornecer a informação similar, como foi mostrado por Roder (1975).

Os fótons são retro-espalhados em direção ao detector são removidos mais por espalhamento ou por absorção, com a probabilidade de foto-absorção sendo fortemente dependente do número atômico. Esta aproximação pode fornecer a informação do número atômico que pode ser usada caracterizando um material como sendo um material explosivo. A composição elementar original dos explosivos resulta num número atômico. Uma combinação da densidade e do número atômico pode então ser usada para caracterizar a presença dos explosivos, tal como a aproximação utilizada em sistemas duplos de raios-X

por transmissão de energia comercialmente disponíveis. A técnica é usada em alguns sistemas de inspeção em aeroportos e de poços de petróleo (Serra, 1984), e foi proposto para a inspeção de bagagens (Hussein, 1994). Entretanto a localização do objeto detectado pode ser difícil, visto que os fótons necessitam se propagar por alguma distância, de modo que suas energias sejam reduzidas até a faixa de energia em que o efeito fotoelétrico se torna dominante e proporcional a Z^5 , permitindo obter-se a informação do número atômico.

Em relação às aproximações acima, deve-se ter em mente que os fótons fornecerão principalmente as informações sobre a densidade do material e seu número atômico, mas nenhuma caracterização específica do elemento. Isto pode ser suficiente para a detecção de minas terrestres, analisando-se um corpo semelhante já identificado. Para maiores informações das possibilidades, vantagens e limitações das técnicas empregando fótons encontram-se em HUSSEIN E WALLER (1998).

(ii) Nêutrons

A vantagem de fótons emergentes de reações nucleares com nêutrons é que podem fornecer a informação dos elementos constituintes do material inspecionado. Esta informação pode ser usada na detecção de explosivos através das emissões características dos fótons produzidas por ativação neutrônica. Como os explosivos usados em minas terrestres são ricos em nitrogênio, a ativação do nitrogênio por nêutrons pode ser usada (CSIKAI, J., DÓCZI, R. and KIRÁLY, B., 2004). A absorção de nêutrons térmicos resulta na emissão de raios gama de 10,8 MeV, que são facilmente distinguíveis. Essa é a base do sistema de análise por ativação com nêutrons térmicos, denominada "MineSCANS", desenvolvido pela Corporação Internacional de Aplicações em Ciências (*Science*

Applications International Corporation – SAIC) (BROWN, D.R. e GOZANI, T.,1996) (WALLER, 1998).

O sistema de espectroscopia isotópica portátil por nêutrons, chamado "PINOS" (Caffrey et. al., 1992), desenvolvidos pelo *Idaho National Engineering & Environmental Laboratory (INEEL)*, emprega uma fonte neutrônica de ^{252}Cf na análise de armas químicas, podendo também ser empregado na detecção de minas terrestres, onde nêutrons são moderados pela camada de solo.

Os nêutrons térmicos podem também ser usados para ativar o hidrogênio e o silício (produzindo fótons de 2.22 MeV e 3.54 MeV, respectivamente). Todos os explosivos militares contêm o hidrogênio entre 2 e 3% (de seu peso), enquanto o solo pode conter várias concentrações de hidrogênio, dependendo de seu índice de água. O silício, entretanto, não está presente nos materiais explosivos, estando apenas no solo. Conseqüentemente, um sistema de ativação por nêutrons térmicos pode ser usado para monitorar a relação de hidrogênio-silício na busca por um material suspeito (IAEA, 1998). Entretanto, desde que os materiais suspeitos possam ser identificados por outros meios que não empreguem a radiação nuclear, tal aproximação não será útil para caracterizar um material suspeito como uma mina terrestre. Por exemplo, um pedaço de madeira pode dar o mesmo conteúdo de hidrogênio e de nitrogênio presentes, numa mina, com nenhuma indicação da presença de silício. Deve-se notar que outros dois elementos encontrados em materiais explosivos, com exceção do hidrogênio e do nitrogênio, isto é, carbono e oxigênio, têm uma baixa seção de choque para ativação, o que dificulta a identificação do explosivo. A análise por ativação com nêutrons térmicos requer o emprego de um material moderador volumoso para termalizar os nêutrons rápidos emitidos pela fonte isotópica. O próprio solo pode ser usado como material moderador, sendo que a quantidade de ativação

dependerá do tipo de solo (em particular, de seu conteúdo do hidrogênio). Uma vez que a probabilidade de ativação (seção de choque) é relativamente baixa, faz-se necessário uma fonte com alto fluxo de nêutrons, que exige o emprego de blindagens mais robustas, segundo as normas de proteção radiológica o que afeta as condições de portabilidade do sistema. Além disso, o nitrogênio está presente em solos férteis e em raízes de árvores. Sob tais circunstâncias, torna-se difícil detectar as minas baseadas no conteúdo de nitrogênio apenas. Além disso, como mencionado anteriormente, o nitrogênio e o oxigênio estão presentes na vegetação, tal como nas raízes de árvores, e, conseqüentemente, sua presença não pode ser suficiente para caracterizar um material explosivo.

A ativação com nêutrons rápidos, principalmente a que envolve reações de espalhamento inelástico dos nêutrons, pode ser usada, tendo em vista os raios gama característicos, a fim de se identificar outros elementos presentes em materiais explosivos. As seções de choque de dois dos principais elementos componentes dos explosivos, o nitrogênio e o oxigênio, têm ressonâncias características na escala de energia de 1 a 3 MeV. O nitrogênio tem picos com ressonâncias em 1,116 MeV, 1,184 MeV, 1,593 MeV, 1,783 MeV, enquanto que o oxigênio tem picos em 1,312 MeV, 1,651 MeV, 1,832 MeV, 1,907 MeV (Gomberg e Kushner, 1991). O uso de nêutrons rápidos para fornecer a composição não é um conceito novo (Hussein, 1992) e a ativação com nêutrons rápidos foi sugerida para a identificação da composição dos explosivos (Sawa e Gozani, 1991). Entretanto, a seção de choque de ativação (probabilidade de interação) dos nêutrons rápidos é baixa para os elementos de interesse, necessitando de uma fonte de nêutrons com elevada intensidade (acima de 10^8 n/s).

Outro sistema pela SAIC é o PFNA (*Pulsed Fast Neutron Analysis*), que emprega nêutrons rápidos com energia em torno de 8 MeV, provenientes da reação nuclear $D(d,n)^3He$ (BROWN, D. R. e GOZANI, T.,1997). Com essa energia, os nêutrons são bastante penetrantes, possibilitando a inspeção de grandes volumes, caminhões, *containers* e podendo ser empregada na detecção de minas terrestres (Vouropoulos et. al., 1997). A técnica de análise por ativação com nêutrons pulsados usa a ativação dos nêutrons rápidos para detectar a presença do hidrogênio, do carbono, do nitrogênio e do oxigênio. Utiliza de nêutrons pulsados com energia em torno de 14 MeV, provenientes de um gerador portátil, para ativar o carbono e o oxigênio presentes no material. Quando o pulso é interrompido, os nêutrons rápidos continuam a se propagar no meio irradiado e, dependendo do tamanho e da natureza do material encontrado, podem ser moderados para uma energia suficientemente baixa (menor que 1 eV), quando podem ser capturados pelo hidrogênio e pelo nitrogênio. Os raios gama emitidos durante e após o pulso neutrônico podem ser usados para detectar os quatro componentes básicos dos explosivos presentes no solo tendo conteúdo suficiente de hidrogênio para termalizar os nêutrons. Entretanto, enquanto os nêutrons pulsados penetram no solo, o número dos nêutrons térmicos que bombardeiam o objeto suspeito pode ser baixo para permitir a análise por ativação.

A seção de choque de espalhamento de nêutrons espalhado é geralmente mais elevada do que a de ativação. Além disso, a seção de choque de retroespalhamento é, em geral, maior do que a probabilidade média de espalhamento, em todos os ângulos (Gomberg e Kushner, 1991). Isto faz com que a ressonância de retroespalhamento seja atrativa para inspeção por somente de um lado como a aplicação de detecção de minas. Medindo-se o espectro de energia de nêutrons retroespalhados e monitorando-se o número

de nêutrons que aparecem nas respectivas energias de ressonância, pode-se determinar se uma grande concentração de nitrogênio e oxigênio está presente no solo. O uso de detectores ao redor de uma única fonte pode então ser usado para fornecer uma imagem da área inspecionada. Gomberg e Kushner (1991) fizeram uma análise da vantagem dessas ressonâncias na seção de choque de espalhamento para distinguir o explosivo de outros materiais contidos em bagagem aéreas. Uma aproximação similar foi usada por Ribeiro *et al.* (1998) para a detecção dos explosivos em pequenas amostras (0.2 kg a 1 kg). Medidas pela técnica de tempo-de-vôo foram usadas nesses trabalhos para se determinar a energia do nêutron, requerendo que a fonte de nêutrons seja um acelerador. Tais técnicas sofisticadas são difíceis de se aplicar, nas condições de campo, para a detecção da mina. Entretanto, o uso do efeito de retroespalhamento para a identificação de material serve particularmente para a detecção da mina. Um esforço adicional deve ser feito, a fim de se desenvolver sistemas menos complexos que usem a vantagem das ressonâncias de retroespalhamento sem a necessidade de executar medidas pela técnica de tempo-de-vôo, permitindo assim o uso de fontes radioisotópicas comuns e de detectores convencionais.

A seção de choque total (absorção e espalhamento) dos nêutrons oferece a vantagem de envolver todos os tipos de interação e, assim, pode fornecer um sinal mais significativo do que o fornecido por meio da ativação e da dependência ângulo/energia de espalhamento, para uma dada fonte de alta intensidade. Embora a transmissão seja inadequada ao problema da inspeção de minas terrestres, o conceito de se medir o efeito total de um sinal incidente deve também ser explorado. Por exemplo, pode ser possível observar os efeitos de ressonâncias nas seções de choque de três dos quatro elementos principais dos explosivos (C, N, O) no intervalo de energia entre 1 MeV e 3 MeV dos espectros de energia

de fontes isotrópicas, tais como ^{252}Cf e $^{241}\text{Am-Be}$. O ^{252}Cf tem uma energia média de aproximadamente 2,14 MeV e estende-se sobre um intervalo de energia entre 0,1 MeV a 14 MeV. Para $^{241}\text{Am-Be}$, a energia média é de 4,5 MeV e seu espectro de energia compreende um intervalo entre 2 MeV e 10 MeV. Medindo-se o espectro de energia de retroespalhamento de nêutrons providos de uma destas fontes, e observando-se as perturbações no espectro de nêutrons, devido às ressonâncias nas seções de choque de espalhamento para os elementos de interesse, pode-se produzir uma assinatura característica ou "impressão digital" de um explosivo, muito similar à técnica de transmissão neutrônica, usada por Gokhale e Hussein (1997).

Outra metodologia consiste em se determinar o conteúdo de hidrogênio no solo, pela termalização do nêutron durante seu percurso nele. Embora o hidrogênio não seja um indicador particular dos explosivos, esse princípio pode ser seguido, com base no fato de que o conteúdo do hidrogênio no solo, em minas terrestres e no ambiente (umidade, vegetação, raízes de árvores, etc...) são completamente diferentes. Brooks (1998) mediu a mudança no conteúdo de hidrogênio no solo pela a intensidade de nêutrons térmicos retroespalhados do solo, quando exposto aos nêutrons providos de uma fonte ^{252}Cf . Esse teste visava as seguintes vantagens: baixo custo, um dispositivo portátil e de fácil operação.

Dentre as variadas opções de emprego da radiação para a detecção de minas terrestres, os nêutrons são mais apropriados por fornecerem a composição dos explosivos, porque interagem diretamente com o núcleo. Os dispositivos baseados em nêutrons tendem, entretanto, a serem volumosos devido aos cuidados de proteção radiológica e às exigências de moderação, em alguns casos, além de serem relativamente caros. Entretanto, dado ao seu potencial, esforços devem ser mantidos no sentido de se desenvolver dispositivos mais compactos e baratos. Nessa linha, recomendam-se o trabalho de Hussein e Waller (1998).

I.4 – Objetivo do trabalho

Este trabalho está associado a uma das linhas de pesquisa desenvolvidas no Laboratório de Neutronografia em Tempo Real (LNRTR) do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ e versa sobre a detecção de explosivos e narcóticos ocultos por materiais. O objetivo principal consiste no estabelecimento, conceitual e prático, do conhecimento necessário para a elaboração de um sistema de inspeção em tempo real, destinado à detecção de minas terrestres. Além disso, objetiva a aplicabilidade da análise por ativação com nêutrons térmicos, aliada a um algoritmo de inteligência artificial aplicativo de redes neurais, que será o responsável pela interpretação dos dados, que foram simulados pelo código de transporte de partículas, baseado no método de Monte Carlo, MCNP, versão 4B, para uma subsequente tomada de decisão.

A motivação desta pesquisa está relacionada à disponibilidade do código MCNP, instalado no Laboratório de Métodos Numéricos (LMN/PEN) e do código Neuroshell 2.0, que funciona como um aplicativo de redes neurais, instalado no Laboratório de Monitoração de Processos (LMP/PEN). Como algoritmo de redes neurais é uma poderosa ferramenta para classificar padrões, ela deverá responder como um discriminador entre os sinais dos materiais estudados nesse trabalho e o sinal referente a mina terrestre.

Esta tese encontra-se dividida em capítulos, onde, no capítulo II, descrevem-se, os fundamentos teóricos seguidos no que concerne: à interação do nêutron com a matéria; à radiografia com nêutrons; à análise por ativação com nêutrons térmicos (TNA); ao código Monte Carlo de transporte de partículas e ao algoritmo de redes neurais.

No capítulo III, relatam-se os processos metodológicos referentes à geração de dados simulados pelo MCNP; à obtenção de espectros gamas provenientes da ativação do

núcleo alvo pelo bombardeamento de nêutrons, numa análise da espessura ideal do material moderador, relativamente à intensidade de fonte necessária para que o fluxo de nêutrons térmicos seja máximo na região do material explosivo, independentemente da profundidade da mina.

No capítulo IV, apresentam-se os resultados e as subseqüentes análises dos dados simulados até o presente momento.

No capítulo V, encontram-se apresentadas as conclusões do trabalho bem como as diretrizes para a trabalho futuros.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1 – A Interação de Nêutrons com a Matéria

Diferente de outros tipos de radiação, como fótons ou partículas carregadas, os nêutrons interagem diretamente com os núcleos dos átomos dos materiais irradiados. Isso ocorre em virtude de serem isentos de carga, o que também faz com que os campos eletromagnéticos do átomo não interfiram em suas trajetórias.

Existem dois processos (CRISPIM, 1993) principais que caracterizam a interação dos nêutrons com a matéria. O primeiro é o espalhamento elástico, que é resultado da colisão de um nêutron com um núcleo, transferindo-lhe sua energia cinética e quantidade de movimento. Após a colisão, o nêutron afasta-se do núcleo deixando-o em seu estado fundamental. O segundo processo é o de absorção, onde o nêutron incidente é absorvido pelo núcleo alvo, gerando diversos outros tipos de fenômenos, os quais derivam do fato de que o núcleo composto retém parte da energia cinética do nêutron, liberando-a, mais tarde, em forma de radiação. Destacam-se como principais fenômenos:

i – *captura radioativa*, em que o núcleo excitado, ao retornar ao seu estado fundamental, emite radiação em forma de partículas carregadas ou de fótons, gerando reações, tais como: (n,γ) , (n,α) , (n, p) e $(n, 2n)$.

ii – *espalhamento inelástico*, onde o nêutron incidente, possuindo uma determinada energia, é absorvido pelo núcleo alvo. Em seguida, o núcleo emite um nêutron com energia inferior ao incidente, retornando ao estado fundamental, após a liberação da radiação, em geral, gama, podendo assim, gerar reações do tipo: (n, n') e $(n, n\gamma)$.

iii – *fissão nuclear*, em que o núcleo alvo é fragmentado em duas ou mais partes, onde, geralmente, desprendem-se dois ou mais nêutrons, raios- γ , neutrinos, etc, liberando dessa reação uma energia considerável.

Como resultado da peculiaridade de suas interações, os nêutrons podem ser classificados de acordo com sua energia cinética, conforme apresentado na tabela II.1

Tabela II.1 – Classificação dos nêutrons em função da energia (BERGER, H. 1963)

Classificação	Faixa de Energia
Nêutrons lentos	$0 < E < 10^4$ (eV)
Nêutrons frios	$E < 0,01$ (eV)
Nêutrons térmicos	$0,01 < E < 0,3$ (eV)
Nêutrons Epitérmicos	$0,3 < E < 10^4$ (eV)
Nêutrons rápidos	10^4 (eV) $< E < 20$ (MeV)
Relativístico	$E > 20$ (MeV)

A seção de choque microscópica, σ , representa a probabilidade de, após a colisão de um nêutron com um núcleo, ocorrer uma reação nuclear em alguma determinada área do

núcleo (HACIDUME, 1999). A seção de choque microscópica total, σ_t , é o resultado do somatório das seções de choque de absorção, σ_a , e de espalhamento, σ_s , ou seja:

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \quad \text{II.1}$$

Uma vez que a seção de choque de absorção possui um leque de diversos tipos de reações possíveis, cada um deles representa uma fração dessa seção de choque e competem entre si (DA SILVA, 1999), ou seja, quanto maior for a seção de choque total, maior será a probabilidade do nêutron incidente ser absorvido ou espalhado. É importante ressaltar que, em determinadas energias, algumas dessas partes da seção de choque de absorção são inexistentes ou desprezíveis.

A atenuação dos nêutrons no objeto inspecionado processa-se distintamente de radiações como o raio-X, por exemplo, onde suas seções de choque aumentam linearmente com o número atômico do material. No caso dos nêutrons, a probabilidade de ocorrer alguma interação com o núcleo do material alvo está relacionada com o nuclídeo em particular, como mostra a figura 1. Nota-se também que, em alguns materiais leves, como o hidrogênio, a seção de choque revela-se muito maior, comparativamente a dos raios-X, e que, para alguns materiais metálicos, as seções de choque comportam-se de modo inverso. Isso possibilita que materiais leves sejam analisados mesmo que envoltos por materiais pesados, o que permite, por exemplo, inspeção da dinâmica de fluidos em tubulações metálicas e diversas outras aplicações.

Os materiais orgânicos são ricos em hidrogênio, elemento muito espalhador de nêutrons. Devido a isso, suas imagens radiográficas com nêutrons térmicos são de baixo contraste.

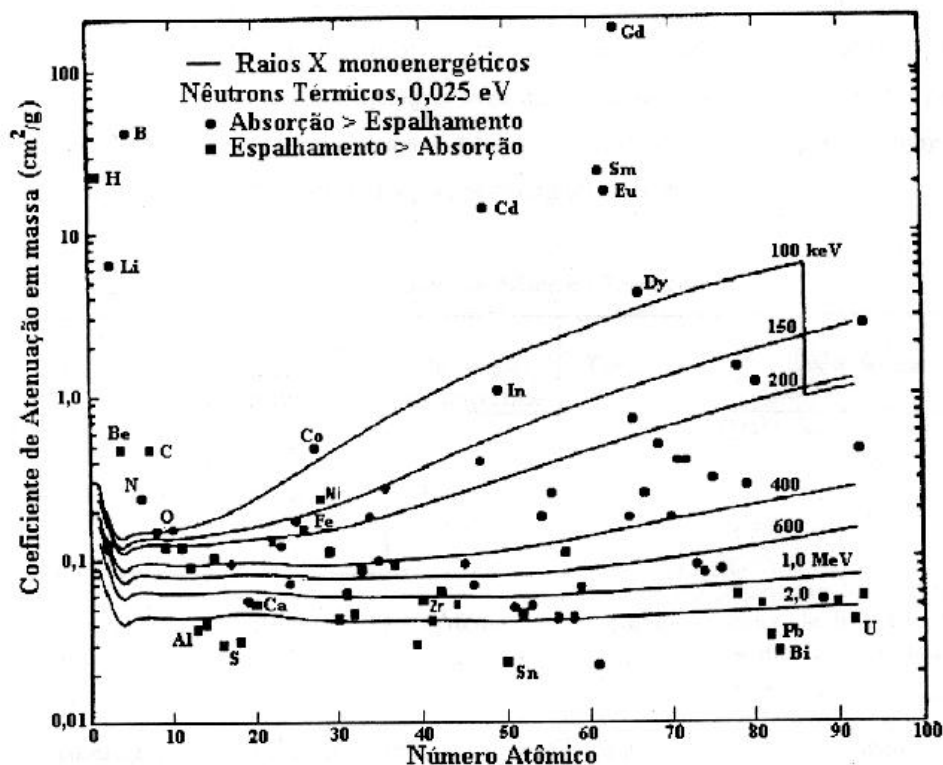


Figura 1 – Coeficientes de atenuação de massa de alguns elementos para nêutrons térmicos e raios-X (HAWKESWORTH, 1977).

II.1.1 – Fontes de Nêutrons

Destacam-se como principais fontes de nêutrons: os reatores nucleares, os aceleradores de partículas e as fontes radioisotópicas. No emprego de cada uma delas, as características mais importantes, que devem ser levadas em consideração, são: a

intensidade da fonte e o espectro de energia dos nêutrons. Essas características influenciam no tempo de exposição e na formação da imagem neutrongráfica.

Os reatores nucleares apresentam alta intensidade de nêutrons na entrada do colimador, de 10^{10} a 10^{13} n/cm².s, possibilitando um feixe bem colimado, de 10^4 a 10^9 n/cm².s no plano da imagem. Isso, além de exigir um tempo de exposição da amostra bem menor, gera imagens neutrongráficas de alta resolução. Porém, deve-se mencionar outros fatores relevantes que se referem ao uso desse tipo de fonte: sua operação não é simples; sua construção requer alto custo; e necessita ainda de cálculos complexos de blindagens.

Os aceleradores de partículas emitem nêutrons rápidos, a partir do bombardeamento de núcleos por partículas aceleradas. Essas partículas energéticas, que podem ser próton, alfa, deutério ou fótons gama, colidem com núcleos leves, tais como: berílio, lítio, trítio ou deutério (Yoshikawa, 2005). Essa interação resulta num núcleo composto e excitado. Segundo LAMARSH (1978), se a energia total de excitação for maior do que a energia de ligação do último nêutron do núcleo composto, existe uma alta probabilidade de ocorrer uma pronta emissão de um nêutron. Assim como os reatores, os aceleradores de partículas não são portáteis e exigem uma blindagem muito maior, que viabilizem o uso dessa fonte.

O emprego de fontes radioisotópicas justifica-se por serem de fácil operação e mais compactas, possibilitando maior facilidade no transporte. Entretanto, esse tipo de fonte fornece uma intensidade de nêutrons menor que os aceleradores de partículas e reatores nucleares, o que exige maior tempo de exposição em cada inspeção.

Para qualquer tipo de fonte neutrônica, há a necessidade de serem otimizadas as dimensões do moderador, da blindagem e da razão de colimação (L/D). Para tanto, se utilizam códigos que simulem a interação dos nêutrons com a matéria. Dentre os códigos mais utilizados, destacamos o MCNP, que baseia seus cálculos no método de Monte Carlo.

II.1.2 – Moderação

Como foi visto no item II.1, existem dois processos principais que caracterizam a interação dos nêutrons com a matéria: o espalhamento elástico e o inelástico.

No espalhamento inelástico, são conservados a energia total e o momento das partículas, mas a energia cinética não é considerada. Dessa forma, parte da energia cinética do nêutron, antes da colisão, é absorvida pelo núcleo que é elevado a um de seus níveis de excitação. Porém, para que o espalhamento inelástico ocorra, o nêutron incidente deve possuir uma energia cinética igual ou maior do que a energia de excitação mínima do núcleo alvo. Por isso, o limiar de energia para o espalhamento inelástico de um núcleo pesado ou médio encontra-se entre 0,1 e 1,0 MeV e, para núcleos leves, o limiar passa a ser maior do que 1,0 MeV (Lamarsh, 1978).

No espalhamento elástico, o nêutron não possui necessariamente uma energia cinética mínima, pois, durante a colisão, conserva-se tanto o momento linear como a energia cinética. Em cada processo de espalhamento, parte da energia do nêutron é transferida para o núcleo e, através disso, a energia do nêutron é moderada. Assim, nêutrons com altas energias podem sofrer espalhamentos elásticos e inelásticos. Entretanto, quando já estão moderados, somente podem sofrer espalhamentos elásticos.

A energia perdida por um nêutron em cada colisão depende da massa do núcleo alvo e do ângulo de espalhamento. Por exemplo, um nêutron pode perder 2% de sua energia ao colidir com um núcleo de U^{238} e pode perder 28% dela se colidir com um núcleo de

carbono. Maiores detalhes sobre a moderação de nêutrons e a relação entre as energias, antes e após a colisão, podem ser obtidos em DUDERSTADT e HAMILTON (1976).

II.1.3 – Blindagem

A blindagem para nêutrons pode ser calculada em três fases: moderação neutrônica, captura dos nêutrons térmicos e absorção da radiação secundária. O feixe de nêutrons é em grande parte atenuado pelo material moderador. Entretanto, o feixe de radiação emergente, que pode ser constituída de partículas ou de fótons, expõe o trabalhador a doses indesejáveis, fazendo-se necessária uma blindagem.

Em geral, na blindagem desses nêutrons moderados, utilizam-se materiais com alta seção de choque de absorção na faixa térmica, como o boro-10, por exemplo. Isso, porque o boro-10 incorpora-se bem a outros materiais moderadores, tais como: o polietileno e a parafina.

II.2 – Análise por Ativação com Nêutrons Térmicos

A análise por ativação com nêutrons térmicos torna-se uma ferramenta poderosa de inspeção. A técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos possui uma vasta gama de aplicações, dentre as quais pode-se destacar a detecção de minas terrestres (PAZIRANDEH, AZIZI, e MASOUDIA, 2006). Como foi visto na seção II.1, uma das reações dos nêutrons, com os núcleos do material alvo, prevista de ocorrer é a de pronta emissão de raios gama (n, γ), representada na figura 2.

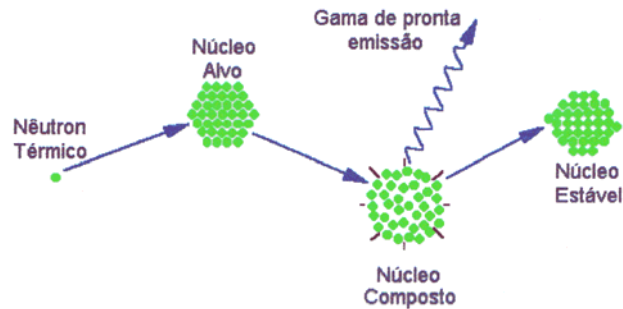


Figura 2 – Captura radioativa (n,γ)

A grande vantagem dessa técnica reside no fato de que os raios gamas emitidos são característicos do material analisado, ou seja, o espectro desses raios gamas característicos forma um registro como o da assinatura de cada substância presente nos materiais inspecionados. Por exemplo, no caso de um material contendo explosivo, um núcleo de nitrogênio-14, após capturar um nêutron térmico (com seção de choque de captura de 1,9 barns), terá 14% de probabilidade de emitir um raio γ característico de 10,8 MeV (GOKHALE, P.P. e HUSSEIN, M. A., 1997). Conhecendo-se o número de raios γ registrados pelo sistema de detecção, o fluxo de nêutrons térmicos e a taxa de reação nuclear, pode-se determinar a quantidade desse elemento na amostra. Apesar disso, a mina terrestre possui uma composição química característica que a distingue do restante dos materiais.

Os raios gama podem ser registrados por detectores cintiladores, tais como: Ge(Li) ou HP-Ge e, em especial, o NaI (Tl). O número de raios γ detectados com uma determinada energia é diretamente proporcional à taxa de desintegração do núcleo alvo, a qual, por sua

vez, está diretamente relacionada à quantidade do isótopo na amostra. Assim, a intensidade de raios γ emitidos pelo núcleo alvo fornece a medida da concentração total do elemento irradiado. Um critério de decisão sobre o julgamento da identidade do material suspeito pode ser adotado, a partir da medida dessas concentrações relativas.

Quando se utiliza análise por ativação para a detecção dessas minas, deve-se levar em consideração a concentração de seus elementos constituintes. No caso dos explosivos plásticos, a principal concentração é de nitrogênio e oxigênio, enquanto que, na cocaína, são abundantes o carbono e o hidrogênio (MILLER, 1994 e CHUNG *et al.*, 1993). Assim, materiais que possuem esses elementos podem servir como falsos positivos ou podem gerar falsos negativos, interferindo na detecção ou não das substâncias ilícitas aqui estudadas.

II.3 – O Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo baseia-se em técnicas estatísticas e ensaios aleatórios repetitivos que simulam problemas físicos e matemáticos. A modelagem do fenômeno a ser simulado é representada por uma função de distribuição de probabilidade, onde são identificados os eventos desse modelo. Dessa forma, são estimadas as quantidades procuradas, sendo que as respostas satisfatórias são calculadas através de médias estatísticas. Na tarefa de obtenção de dados que representem e substituam os ensaios aleatórios, pode-se criar um extenso banco de dados contendo informações experimentais. Entretanto, para minimizar os custos computacionais relacionados à elevada capacidade de memória necessária para armazenar esse banco de dados, os números dos ensaios aleatórios

são determinados por um algoritmo computacional. Esse algoritmo gera dados que satisfazem à aleatoriedade, pois é fundamentado em fórmulas de recorrência. A grande vantagem desse método está no fato de que ele simula cada evento separadamente. Em seguida, agrupa esses eventos para formar a resposta mais ampla de um determinado fenômeno. Dessa maneira, permite que processos mais complexos sejam simulados, a partir de um conjunto de eventos simples.

O método de Monte Carlo é bastante utilizado em simulações computacionais que envolvam a teoria do transporte de partículas. Diante de diversos outros métodos de simulação (YANCH *et al.*, 1992) ele tem demonstrado excelente desempenho, com respostas mais confiáveis e satisfatórias. Para as simulações realizadas neste trabalho, empregou-se a versão 4B do código MCNP (BREISMEISTER, 1997), que se baseia no método de Monte Carlo, cujas propriedades serão relatadas a seguir.

II.3.1 – O Código MCNP

O MCNP (*Monte Carlo N-Particle*) é um código de propósito geral que é usado para simular o transporte de fótons e de partículas. Esse código é capaz de simular a interação da radiação com a matéria em qualquer tipo de sistema tridimensional. Podem ser modelados os transportes de elétrons e fótons, entre 1 keV e 100 GeV, e de nêutrons, entre 10^{-11} MeV e 20 MeV (HENDRICKS, 2000). Foi desenvolvido no laboratório de Los Alamos, durante o projeto de Manhatann (BREISMEISTER, 1986) e está escrito nas linguagens Fortran 77 e C. Está disponível em diversos sistemas operacionais, a saber: Windows, SUN, SGI, HP, DEG e UNICOS (Cray). Devido ao seu desempenho, o código MCNP tem sido utilizado por um crescente número de pesquisadores. A cada dia, são

publicados artigos relatando suas aplicações valiosas na resolução de vasta variedade de problemas (HENDRICKS, 2000).

Os cálculos desenvolvidos pelo MCNP são recorrentes a uma biblioteca de seções de choque seguidos de um arranjo de forma pontual (energia contínua), discreta ou de multigrupo; além disso, ele possui diversas técnicas de redução de variância. Seu arquivo de entrada de dados permite que o usuário escolha os tipos de fonte, detector, a configuração geométrica e as condições gerais do sistema desejado. Dessa forma, todos os parâmetros desejados pelo usuário podem ser definidos para a simulação.

O MCNP em sua versão 4B foi extensivamente utilizado neste trabalho na geração de espectros γ provenientes da interação dos nêutrons térmicos com os núcleos alvos (análise por ativação).

Nos casos estudados neste trabalho, foram simulados diversos materiais que podem ser encontrados no solo sendo utilizados como falsos positivos. Para cada simulação, necessitou-se apenas da composição química e da densidade dos materiais, que podem ser encontrados na literatura especializada no assunto.

II.4 – Redes Neurais

Redes neurais são modelos matemáticos inspirados no cérebro humano, que possuem a capacidade de extrair conhecimento, a partir de um conjunto de dados previamente estabelecidos (HAYKIN, 1999). Esses modelos matemáticos apresentam-se como uma poderosa ferramenta de inteligência artificial, que podem ser aplicáveis na solução de diversos problemas diferentes.

As redes neurais são compostas por várias unidades de processamento chamadas de neurônios, cujo funcionamento é bastante simples. As ligações entre neurônios denominam-se sinapses. A ativação de um neurônio depende dos pesos atribuídos às sinapses, w_{ij} , que são avaliadas pelas funções de ativação. O comportamento da rede, em um determinado problema, é o reflexo dessas sinapses, que interligam seus neurônios conforme ilustra a figura 3, onde w_{ij} é o peso na sinapse entre os neurônios i e j ; Σ é o somatório de todas as entradas do neurônio v_i ; φ , a função de ativação; e e , o erro calculado pela diferença entre a saída desejada, d_i , e a saída da rede, y_i .

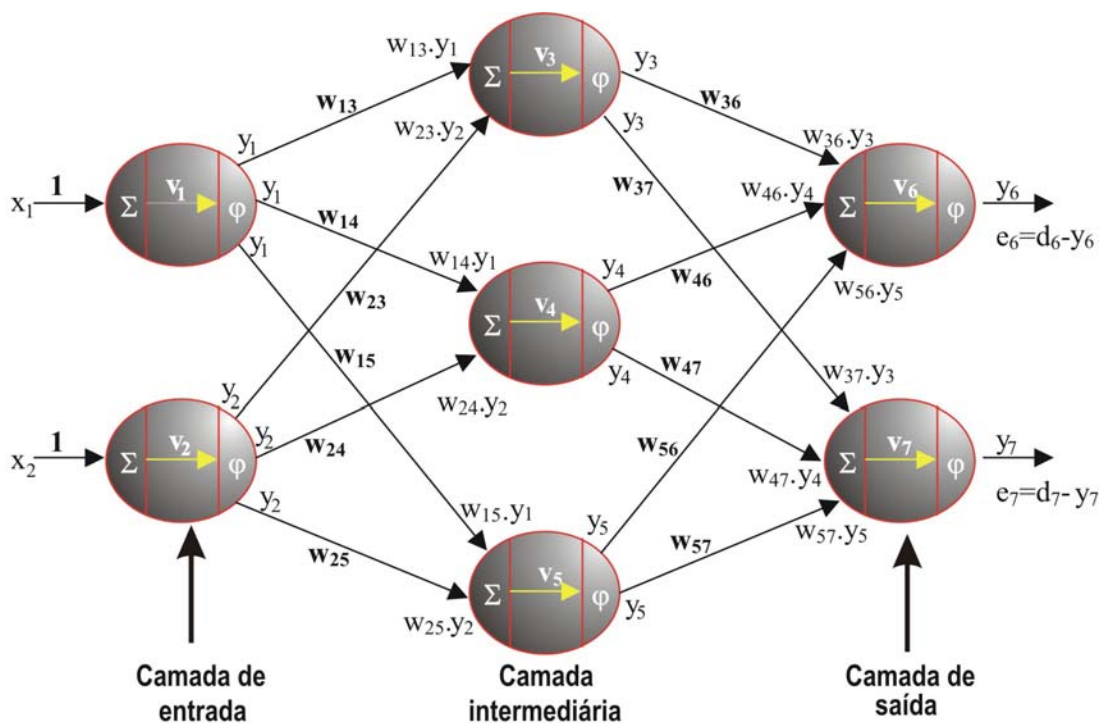


Figura 3 – Propagação dos sinais de entrada de uma rede neural.

As redes neurais possuem algumas regras de treinamento, onde os pesos w_{ij} de suas sinapses são ajustados, de acordo com os padrões apresentados, fazendo com que a rede

aprenda através de exemplos. A rede aprende ajustando repetidamente os pesos de suas sinapses, comparando seus valores na saída da rede com os esperados. A aprendizagem de uma rede neural é o processo de adaptação aos dados de treinamento, enquanto que o treinamento é o processo de adaptação pelo qual deseja-se viabilizar o aprendizado. O treinamento tem por objetivo selecionar os pesos que melhor adaptam a rede neural aos dados apresentados, a fim de que ela desempenhe a função desejada (TAFNER, XEREZ e FILHO, 1996).

Existem principalmente dois tipos diferentes de treinamento de redes neurais: *i* – modo supervisionado, onde as redes neurais são treinadas para classificar padrões, fazer predições para auxílio a tomada de decisões, a partir dos padrões aprendidos durante o treinamento. As respostas obtidas pela rede baseiam-se na variedade de padrões usados para instruí-la. Assim, apresenta-se à rede um grande número de exemplos de como devem ser feitas as classificações, predições ou decisões, com os quais ela aprende a responder cada vez mais corretamente. *ii* – modo não-supervisionado, onde as redes neurais classificam um número de padrões em um conjunto de categorias, sem que, previamente, sejam mostradas a forma pela qual a categorização é feita. Essa análise ocorre através do agrupamento de padrões. Esse agrupamento é feito pela proximidade dos padrões em um espaço *n*-dimensional, sendo *n* o número de entradas da rede. Na maioria dos casos, basta informar à rede o número máximo de categorias, que ela agrupa os dados em cada uma delas.

A técnica de redes neurais também foi amplamente utilizada neste trabalho. Os dados gerados pelo código MCNP, referentes aos espectros gama provenientes da análise por ativação, foram analisados computacionalmente por essa técnica de inteligência artificial e o seu treinamento, implementado pelo modo supervisionado.

II.4.1 – Algoritmo de Retropropagação

O treinamento e a escolha adequada do tipo de arquitetura a ser empregada são fatores preponderantes para o sucesso da implementação dessa técnica.

Existem diversos tipos de treinamento de redes neurais. Porém, os que se aplicam à maioria dos problemas são as redes de retropropagação. Nesse algoritmo, a rede opera em dois estágios. No primeiro, um padrão é apresentado à camada de entrada da rede. Em seguida, a atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No estágio seguinte, a saída é obtida e comparada com a saída desejada. Em seguida, o erro é calculado e, nesse ponto, o erro é propagado, a partir da camada de saída, até a camada de entrada, modificando-se os pesos das sinapses nas camadas intermediárias, enquanto o erro é retropropagado (HAYKIN, 1999).

Para se calcular a correção dos pesos no algoritmo de retropropagação (*backpropagation*), considera-se que o erro no neurônio j na iteração, n , seja dado por:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad \text{II.5.1}$$

onde $d_j(n)$ é a saída desejada e $y_j(n)$ é a saída da rede.

O Erro Quadrático Instantâneo é definido como (AUBIN, 1996):

$$E_j(n) = \frac{1}{2} e_j^2(n) \quad \text{II.5.2}$$

Somando-se os $E_j(n)$ da camada de saída, C, tem-se:

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad \text{II.5.3}$$

Assim, o Erro Médio Quadrático, é definido como a média dos erros Quadráticos Instantâneos durante as iterações:

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n) \quad \text{II.5.4}$$

Em um dado trecho da rede, entre os neurônios i e j , a correção de pesos é calculada por:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad \text{II.5.5}$$

onde η é a *taxa de aprendizado* e w_{ji} é o peso na sinapse entre os neurônios j e i ;

Segundo a regra da cadeia, pode-se escrever:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad \text{II.5.6}$$

Diferenciando II.5.3, temos:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} = e_j(n) \quad \text{II.5.7}$$

Diferenciando II.5.1:

$$\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} = -1 \quad \text{II.5.8}$$

Como:

$$y_j(n) = \varphi_j(v_j) \quad \text{II.5.9}$$

Logo:

$$\frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = \varphi'_j(v_j) \quad \text{II.5.10}$$

Sabendo-se ainda que:

$$v_j(n) = \sum_j w_{ji}(n) \cdot y_i(n) \quad \text{II.5.11}$$

Então:

$$\frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} = y_i(n) \quad \text{II.5.12}$$

Substituindo II.5.7, II.5.8, II.5.10 e II.5.12 em II.5.6, obtêm-se:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n) \cdot \varphi'(v_j(n)) \cdot y_i(n) \quad \text{II.5.13}$$

Dessa forma:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \cdot e_j(n) \cdot \varphi'(v_j(n)) \cdot y_i(n) \quad \text{II.5.14}$$

Define-se *gradiente local*, $\delta_j(n)$, como:

$$\delta_j(n) = e_j(n) \cdot \varphi'(v_j(n)) \quad \text{II.5.15}$$

Assim,

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n) \quad \text{II.5.16}$$

Para amenizar o desconforto de um aprendizado lento por parte da rede neural, deve-se aumentar a taxa de aprendizado. No entanto, a utilização de uma elevada taxa, pode causar outro problema sério, ou seja, fazer com que a rede oscile. Isto dificultará bastante o aprendizado. Para solucionar esse problema, uma técnica denominada *momento* deve ser utilizada. O *momento* depende da correção do peso na iteração anterior. Para tal, é introduzido um termo de realimentação que tornará a rede mais estável. Dessa forma, a equação II.5.16, pode ser reescrita como:

$$\Delta w_{ji}(n) = \alpha \Delta w_{ji}(n-1) + \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n) \quad \text{II.5.17}$$

onde α é chamada de *constante de momento*.

II.4.2 – A parametrização da informação

Um dos pontos cruciais na implementação de redes neurais artificiais é a escolha do modelo de informação a ser fornecida para o treinamento da rede neural. Tal modelo consiste basicamente na parametrização das entradas e saídas da rede.

Do total de padrões armazenados na base de dados, os espectros referentes a um determinado material (escolhido aleatoriamente) foram retirados, formando um conjunto denominado de conjunto de produção, de forma a ser utilizado para a avaliação do desempenho das redes neurais treinadas para um conjunto de espectros independentes. Os demais espectros foram incluídos num conjunto denominado padrão.

O conjunto padrão foi por sua vez dividido em dois subconjuntos: o conjunto de treinamento e o conjunto de teste. O particionamento do conjunto padrão entre conjunto de treinamento e conjunto de teste consistiu em dividir aleatoriamente todo o conjunto padrão, de forma a ser realizada uma validação cruzada entre os desempenhos da rede sendo treinada para o conjunto de treinamento utilizado e um conjunto de dados novos, não apresentados à rede durante o seu treinamento.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

A detecção de minas terrestres encontra-se longe de ser um problema de simples resolução, principalmente, no que diz respeito ao uso de radiação penetrante para tal. Conforme relatado no capítulo anterior, não é possível se utilizar a transmissão da radiação e o espalhamento de raios-x é ineficaz, relativamente aos elementos de número atômico baixo, tais como os principais componentes do material explosivo. Neste trabalho, optou-se pela técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos, pois os explosivos encontrados em minas terrestres são ricos em nitrogênio. A ativação do nitrogênio, pela captura de nêutrons térmicos, resulta na emissão de raios- γ característicos de 10,8 MeV, facilmente distinguíveis, não fosse a presença do nitrogênio nos solos férteis e nas raízes de vegetais, além disso, este pico pode ser confundido com o de 10,6 MeV característico do silício presente no solo. Outros elementos constituintes do explosivo (carbono, oxigênio e hidrogênio) também têm ressonâncias e possuem picos de raios- γ característicos de 4,9 MeV, 1 MeV e 2,2 MeV, respectivamente. A detecção da mina terrestre é dificultada, porque esses elementos fazem parte da composição química de materiais orgânicos, de pedaços de plástico e do solo.

Com o código MCNP4B foi possível simular a reação nuclear entre os nêutrons incidentes e os núcleos dos átomos constituintes dos materiais aqui estudados. Os espectros obtidos pelo código MCNP4B compõem a base de dados de entrada para o treinamento das redes neurais. No treinamento de cada rede neural, utilizou-se o algoritmo de retropropagação. Para a aplicação dessas redes, foi utilizado o código Neuro Shell 2.0.

Diversas formulações químicas foram escolhidas para os diversos materiais que podem ser encontrados no solo. Essa lista de materiais foi elaborada através da consulta à literatura especializada sobre o assunto (MAUCEC e MEIJER, 2002. ZUIN *et al.*, 2000. NEBBIA, 2001. BRAZ *et al.*, 2001, VOURVOPOULOS e WOMBLE, 2001. BESSA, 1996. BRADY, 1984. HUSSEIN e WALLER, 2001). Os materiais selecionados, bem como suas composições químicas e respectivas densidades, encontram-se listados na tabela III.1.

Tabela III.1 – Materiais utilizados nas simulações .

Material	Fração em massa												Densidade (g/cm ³)
	H	C	O	N	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	Pb	Ar	
Polietileno	0,14	0,86											0,90
Madeira	0,06	0,55	0,35	0,04									1,00
Granito	0,01		0,56		0,01	0,04	0,32	0,02	0,03	0,01			2,5
Concreto	0,01		0,54		0,02	0,03	0,34	0,01	0,04	0,01			2,5
Areia			0,53				0,47						2,12
Calcáreo		0,12	0,48						0,40				2,70
TNT	0,02	0,37	0,42	0,19									1,65
Água	0,11		0,89										1,00
Ar			0,23	0,76								0,01	1,293E-3
PHD	0,14	0,86											0,98
Chumbo											1,00		11,34
Solo (0% de água)	0,01		0,56			0,07	0,36						1,9
Solo (5% de água)	0,015		0,5765			0,0665	0,342						1,855
Solo (10% de água)	0,02		0,593			0,063	0,324						1,81
Solo (15% de água)	0,025		0,6095			0,0595	0,306						1,765
Solo (20% de água)	0,03		0,626			0,056	0,288						1,72
Solo (25% de água)	0,035		0,6425			0,0525	0,27						1,675
Solo (30% de água)	0,04		0,659			0,049	0,252						1,63

III.1 – Otimização do fluxo de nêutrons térmicos no explosivo através de simulação via MCNP4B

O sistema foi modelado de acordo com a configuração geométrica tridimensional desejada, por que o código é de propósito geral. Os valores de seção de choque dos dados nucleares pertinentes aos materiais em foco neste trabalho foram obtidos do arquivo TMCSS1 de energia contínua e com referida secção de choque. A fonte utilizada em todas as simulações foi de Cf^{252} com uma taxa de emissão de 1 nêutron por segundo.

Otimizar o sistema, em termos de se aumentar a chance de detecção da mina terrestre, significa maximizar a probabilidade de interação dos nêutrons térmicos com o material explosivo da mina, o que seria possível se o fluxo de nêutrons térmicos no local do explosivo alcançasse o máximo valor, tornando a probabilidade da geração de fótons gama, através da ativação neutrônica, a maior possível, o que resultará num espectro de raios γ contendo picos de maior intensidade, facilitando, posteriormente, o treinamento da rede neural.

Em primeira instância, estimou-se a espessura de moderador para que corresponde ao fluxo de nêutrons máximo no local do explosivo, variando-se a espessura do moderador de 1 a 8 cm com incrementos de 0,5 cm.

Como seriam estudados casos onde a profundidade da mina também seria variável, para cada espessura do moderador, foram realizadas simulações em profundidades que variam de 5 a 25 cm, com incrementos de 5 cm. Essa variação da profundidade da mina pode ser encontrada na literatura especializada sobre o assunto e referem-se às profundidades mais prováveis onde se encontram as minas (MAUEC e MEIJER, 2002. NEBBIA, 2001. ZUIN *et al.*, 2000. VIESTI, 2001).

Para esses cálculos preliminares, a configuração do sistema, será tratada no item seguinte, sendo que, nessas simulações preliminares, os detectores de NaI(Tl) não

comporão o sistema, visto que o objetivo era se determinar o fluxo máximo de nêutrons térmicos na área do explosivo.

III.2 – Geração de fótons simulados pelo MCNP4B

Dois sistemas para a detecção de minas terrestres foram modelados, usando-se a base de dados nucleares para nêutrons, fornecida pelo arquivo B-VI (ENDF/B-VI), de energia contínua e com referida secção de choque. Para os fótons foi utilizada a biblioteca MCPLIBO2 (DLC-189 XS).

Inicialmente, simulou-se um sistema ideal, dotado de um detector esférico, em geometria 4π , contando todos os raios gama que atravessam a superfície de detecção através do *tally* F1 (VITORELLI *et al.*, 2005). O *tally* F1 é o comando do MCNP que fornece a corrente integrada sobre uma superfície, nesse caso a esfera. Estes raios gama são provenientes das interações dos nêutrons com a amostra constituída de solo e TNT. Mesmo sendo ideal, para efeito de simulação, o sistema reduz o tempo computacional, pois registra todos os raios gama produzidos pelas reações nucleares (n, γ) ocorridas. Além disso, os resultados preliminares podem sinalizar a aplicabilidade ou não da técnica para o caso estudado. A Figura 4 mostra a configuração sistema ideal considerado com detector esférico, em disposições tridimensional e bidimensional, respectivamente.

Neste sentido, simulou-se uma esfera, centrada na origem do sistema, com de 43,7 cm de raio, envolvendo um cilindro de 33,6 cm de raio e 10 cm de altura, contendo, em seu centro um cilindro de TNT (mina) com 5,6 cm de raio e 4,6 cm de altura. Uma fonte isotrópica pontual e monoenergética emitindo nêutrons com 25meV, localiza-se a 11,5 cm acima do solo.

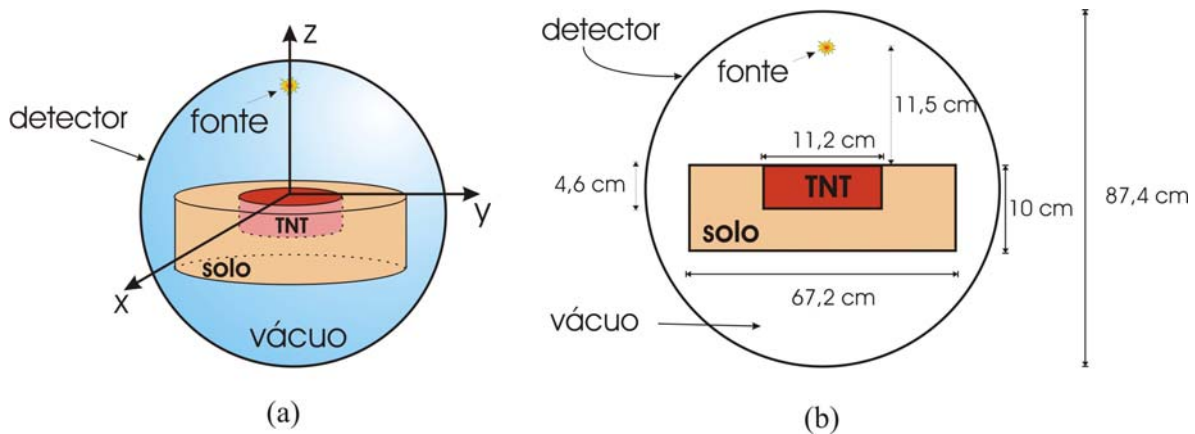


Figura 4 – Configura o do sistema ideal. (a) 3D; (b) sec o plana

Após a obten o dos resultados, foi aplicada a seguinte fun o aos dados simulados:

$$f(x_i) = e^{(x_i - a_i)}, \quad 3.2.1$$

onde i varia de 1 a 11 MeV, com incrementos de 100 keV; a_i   a intensidade de fótons na faixa i de energia do espectro emergente do solo, ou seja, sem a presença de nenhum outro material; e x_i   a intensidade de fótons na faixa i de energia do espectro emergente do solo com a presença dos oito primeiros elementos descritos na tabela III.1. A fun o $f(x_i)$ será estudada no item III.3, sendo que sua aplica o possibilitou uma melhor diferencia o dos dados e facilitou a identifica o pela rede neural. Isto se deve ao fato de $f(x_i)$ ser uma fun o monot nica e as diferenças são reforçadas exponencialmente.

Um segundo sistema, mais próximo do real, foi desenvolvido. As características desse novo sistema são as seguintes: simulou-se um cilindro, que compreendesse todo o sistema, com 33,6 cm de raio e 72 cm de altura. O cilindro foi dividido em duas partes pelo plano xy, possuindo a parte superior do cilindro ($z=0$ a $z=32$ cm) com ar em seu interior. A fonte isotrópica e pontual emissora de nêutrons foi localizada em $z=13,5$ cm, sendo

envolvida por uma esfera de chumbo também centrada em $z=13,5$ cm, tendo 3 cm de raio. A esfera de chumbo foi ainda coberta por uma outra esfera de polietileno de alta densidade ($0,98$ g/cm²) com 2 cm de raio, igualmente centrada em $z=13,5$ cm. Ao redor da esfera de polietileno foram colocados os detectores de NaI (TI), posicionados a 5,58 cm do solo, em forma de uma coroa circular cilíndrica com raios concêntricos de 6,5 cm e 14,12 cm e 5,92 cm de altura, contando pulsos através do *tally* F8 (VITORELLI *et al.*, 2005). O *tally* F8 é o comando do MCNP que fornece a distribuição de pulsos de energia criados em um detector, nesse caso o NaI (TI). A parte inferior do cilindro, que compreende a região do sistema entre $z=0$ cm e $z=-40$ cm foi preenchida com solo, de acordo com o acréscimo de água apresentados na tabela III.1. Nesta região, simulou-se uma mina de forma cilíndrica, com 5,6 cm de raio e 4,6 cm de altura, localizada numa profundidade variável entre 5 cm e 25 cm abaixo da origem, com incrementos de 5 em 5 cm. A configuração geométrica do sistema fonte-mina-detector está representada na Figura 5.

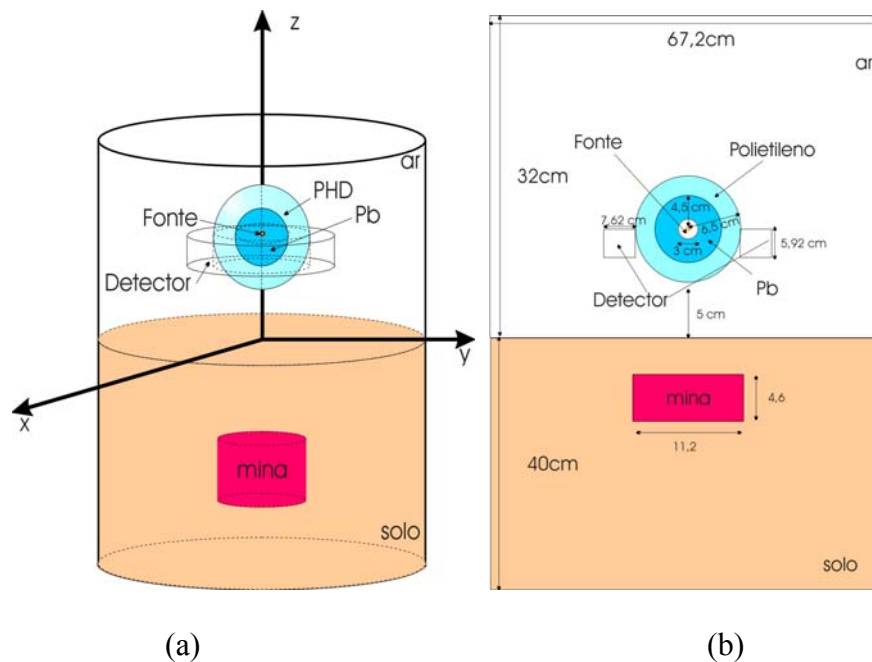


Figura 5 – Configuração geométrica do sistema fonte-mina-detector. (a) tridimensional; (b) bidimensional.

III.3 – Aplicação das Redes Neurais na Interpretação dos Dados Simulados

Os dados gerados pelo código MCNP referentes ao sistema ideal foram utilizados como dados de entrada e saída para o treinamento de diversas redes neurais. Na seqüência, eles são inseridos no código NeuroShell 2.0 e aplicados a diversas arquiteturas e padrões distintos de redes. As redes neurais aplicadas neste trabalho, que apresentaram melhores resultados diante do problema estudado, possuem três camadas e estão baseadas no algoritmo de retropropagação. Para o sistema ideal trabalhou-se com uma arquitetura de rede onde, na primeira camada, foram utilizados 100 neurônios, que correspondem aos canais de energia entre 1 e 11 MeV (igualmente espaçados de 100 em 100 keV.), nos quais foi aplicada a função de ativação linear [-1,1]. Na camada seguinte usou-se a logística como função de ativação a logística e um número total de 80 neurônios. Na última camada, empregou-se 6 neurônios, cada um deles representando um dos materiais da tabela III.1, e a função de ativação escolhida foi também a logística. Já o sistema próximo do real, foi feita uma arquitetura de rede onde, na primeira camada, foram utilizados 100 neurônios, que correspondem aos canais de energia entre 1 e 11 MeV (igualmente espaçados de 100 em 100 keV), sobre os quais foi aplicada a função de ativação tangente hiperbólica. Na camada seguinte, usou-se como função de ativação a complementar da Gaussiana e um número total de 70 neurônios. Na última camada, a função de ativação escolhida foi a logística e empregaram-se sete neurônios. Cada um dos neurônios representam um dos sete primeiros materiais da tabela III.1, com exceção do espectro referente à madeira que foi utilizada

como elemento de produção da rede. Como parâmetros de entrada, foram selecionados: uma taxa de aprendizagem de 0,1, momento em 0,44 e peso inicial dos neurônios em 0,3.

No intuito de se verificar a aplicabilidade da função (eq. 3.2.1) e comparar o melhor resultado, foram inseridos dados normalizados com aplicação da função e sem a sua aplicação.

Antes do treinamento da rede neural, o código NeuroShell 2.0 cria três arquivos de entrada de dados, a saber: *i* – Arquivo de Treinamento, onde cada espectro é usado para o treinamento das redes; no caso de serem elaboradas com algoritmo de retropropagação, para a avaliação dos erros, são usados na conseqüente correção dos pesos de cada neurônio; *ii* – Arquivo de Teste, onde se encontram os espectros que deverão servir para testar os resultados da rede; *iii* – Arquivo de Produção, que comporta os espectros que não serão treinados e nem testados, durante a aprendizagem da rede, servindo para avaliar a capacidade de resposta em novas situações. Pode-se considerar este arquivo ou não.

Na tentativa de se verificar o aprendizado e a eficiência da rede no problema estudado, os materiais: calcário e granito foram excluídos dos arquivos de Teste e de Treinamento, sendo incluídos no arquivo de Produção, como mostra a tabela III.2, para o caso do sistema ideal. No caso do sistema mais próximo do real, o espectro referente à madeira foi selecionado para produção, pois apresenta uma composição química semelhante à da mina e seria o caso de maior complexidade de reconhecimento de padrão para rede, como mostram as tabelas III.1 e III.2 Isso possibilitará uma avaliação da capacidade de generalização da rede, diante dos dados apresentados.

Os resultados referentes à aplicação das redes neurais aplicadas nos espectros simulados pelo MCNP foram expressos em porcentagem baseada no coeficiente R^2 denominado *coeficiente de determinação múltipla*. Este coeficiente é um indicador

usualmente aplicado para análise de regressão múltipla. Este compara a exatidão de um modelo com relação a exatidão de um modelo de referência, no qual a predição é a medida de todas as amostras. Um ajuste perfeito resulta em $R^2=1$, um ajuste “muito bom” resulta em $R^2 \cong 1$ e um ajuste muito pobre resulta em $R^2 \cong 0$. Ou seja, se as predições de uma rede neural são muito ruins em relação às saídas esperadas, o valor de R^2 irá ser próximo a zero. Pode-se definir tal coeficiente matematicamente como representado na equação III.1.

$$R^2 = \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad \text{III.1}$$

onde y é o valor esperado, \hat{y} é o valor de y predito pela rede neural, e \bar{y} é a média dos valores de y .

Tabela III.2 – Condições de entrada para a rede neural: TReinamento, TEste e Produção.

Substância	Condições de entrada (sist. Ideal)	Condições de entrada (sist. Prox. do real)
MINA	TR/ TE / P	TR/ TE / P
AREIA	TR/ TE / P	TR/ TE / P
POLIETILENO	TR/ TE / P	TR/ TE / P
MADEIRA	TR/ TE / P	P
CALCÁRIO	P	TR/ TE / P
<i>CONCRETO</i>	TR/ TE / P	TR/ TE / P
<i>GRANITO</i>	P	TR/ TE / P
<i>SOLO</i>	TR / TE /P	TR/ TE / P

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Este capítulo encontra-se dividido em três partes, sendo a primeira destinada à apresentação e discussão dos resultados referentes às modelagens de sistemas ideais, que serviram para se obter as primeiras impressões quanto a aplicabilidade da técnica de análise por ativação para a detecção de minas terrestres; na segunda parte, modelou-se um sistema com características mais próximas das de um caso real, revelando a complexidade do

problema estudado; na última parte, encontram-se os testes relativos à aplicação de redes neurais aos dados simulados nos itens anteriores.

IV.1 – Modelagens de sistemas ideais

Com o propósito de se verificar a aplicabilidade da técnica de análise por ativação neutrônica ao problema de detecção de minas terrestres, foram simulados, inicialmente, três modelagens: na primeira, considerando-se a ausência de explosivo; na segunda, o explosivo está presente, mas há ausência de solo; e na terceira, há a presença do explosivo no solo, sendo os espectros correspondentes apresentados na Figura 6. É importante notar o quanto a presença do solo dificulta a identificação do explosivo. Os dados referentes ao solo sem a presença do explosivo e os do solo com a presença do explosivo são praticamente idênticos. Por esse motivo, foi necessário um tratamento desses espectros por meio de uma função espectral residual, $f[\phi(E)]$, expressa pela equação 3.2.1, cuja utilidade é separar espectros muito semelhantes.

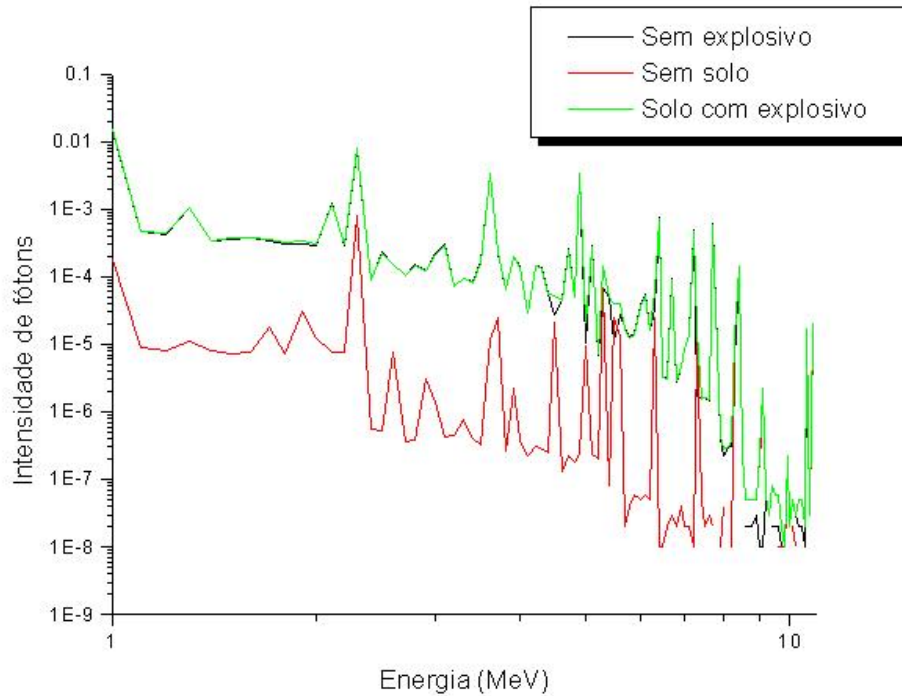


Figura 6 – Comparação entre os espectros simulados: somente solo (preto); somente explosivo (vermelho) e solo com a inclusão do explosivo (verde).

A função $f[\phi(E)]$ caracteriza o resíduo entre o espectro do solo com a inclusão/deposição dos materiais areia, TNT, polietileno e madeira, e o espectro do solo. Ela visa isolar a resposta espectral relativa à inclusão suspeita, de forma a treinar a rede neural, no processo de decisão sobre a existência ou não do material explosivo. Esses materiais foram escolhidos pelo fato de possuírem composições químicas semelhantes. Observa-se nas figuras 7(a), 8(a), 9(a) e 10(a), respectivamente, a formação de picos ou vales apresentando uma correlação com a energia dos fótons emitidos pela interação dos nêutrons com cada material. Observa-se ainda que cada pico se refere ao material incluído no solo e cada vale, aos elementos constituintes do solo.

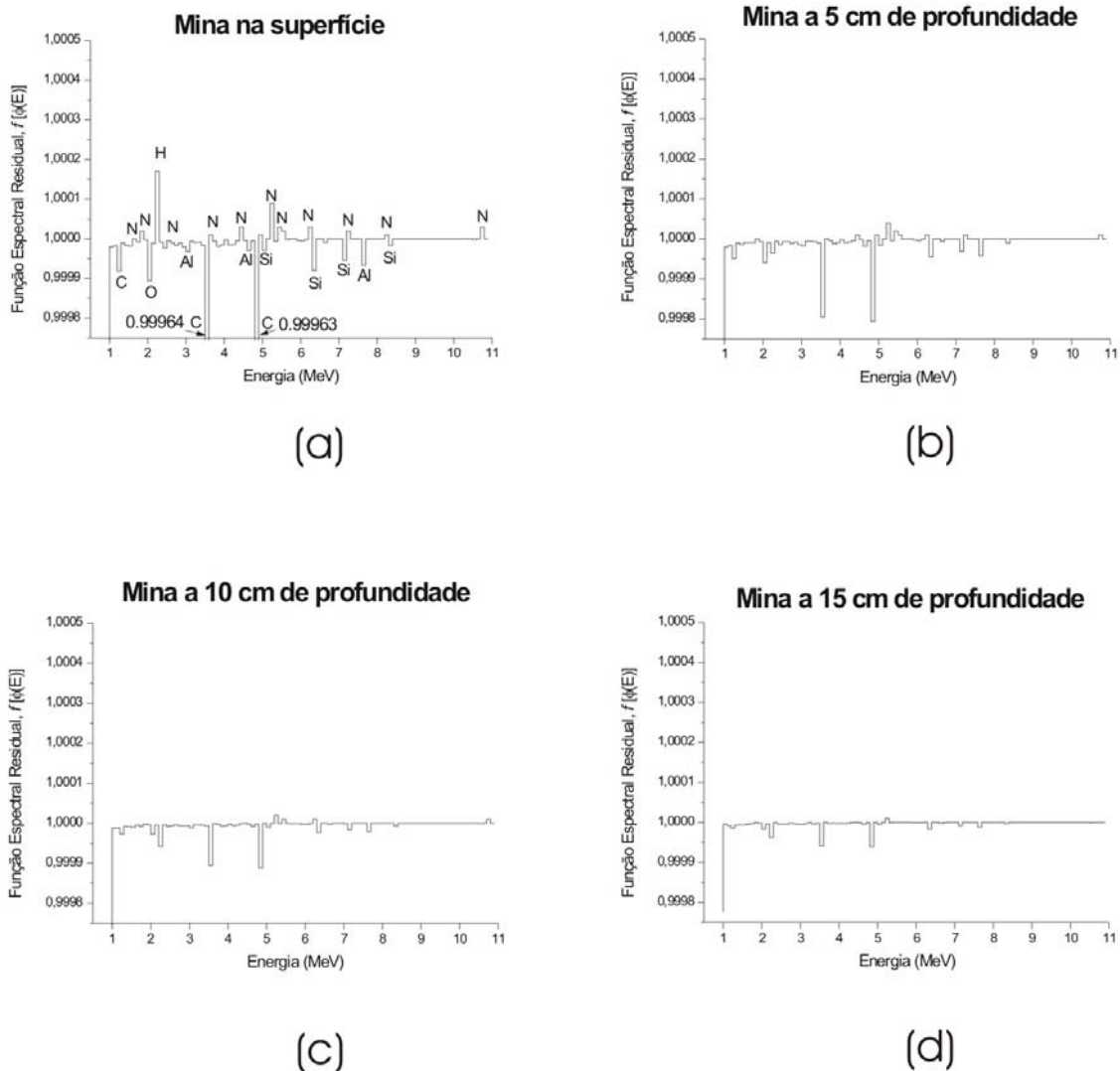
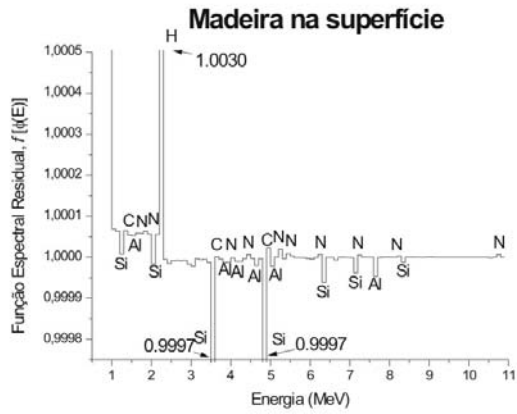


Figura 7 – Função espectral residual relativa à deposição de uma mina (TNT) no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.

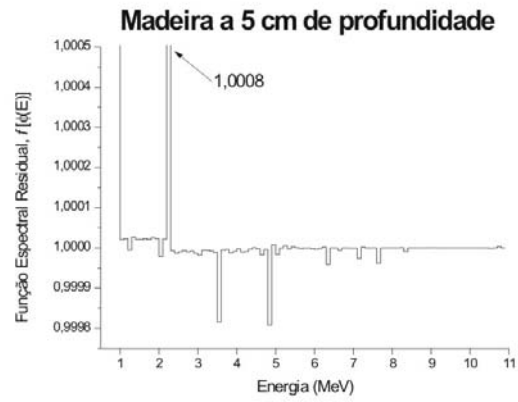
Os espectros apresentados nos itens b, c e d das figuras 7 a 13 revelam que os vales diminuem com o aumento da profundidade da mina. Isso se deve à diferença entre os espectros com a inclusão da mina e do solo, que tendem a aproximar seus valores, devido à perda de energia dos nêutrons por espalhamento com os núcleos constituintes do solo.

Nas figuras 8 a 13 são apresentadas as funções espectrais residuais relativas aos demais materiais, em profundidades diferentes. Na figura 7, pode-se observar picos referentes à presença do nitrogênio, em 10,8 MeV, que se destaca numa região de alta energia (7 MeV a 11 MeV). Este pico não se encontra em nenhum outro material estudado (figuras 9-13), com exceção da madeira (figura 8). Entretanto, como a concentração de nitrogênio na madeira é menor que a da mina, os espectros da madeira mostram picos que são praticamente imperceptíveis para este objeto enterrado a partir de 10 cm de profundidade.

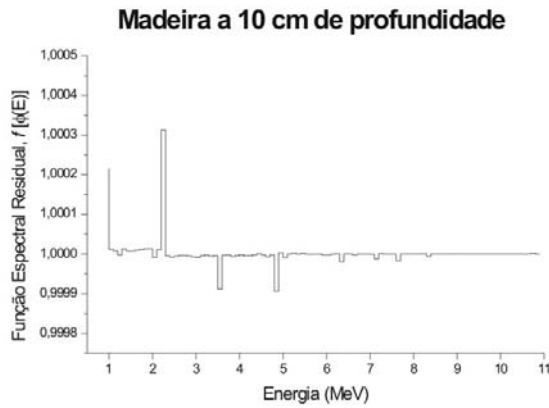
Uma vez que, por análise visual de cada um desses gráficos, já é possível a identificação dos padrões que os diferenciam, espera-se que, para a rede neural, esse reconhecimento de padrão será trivial.



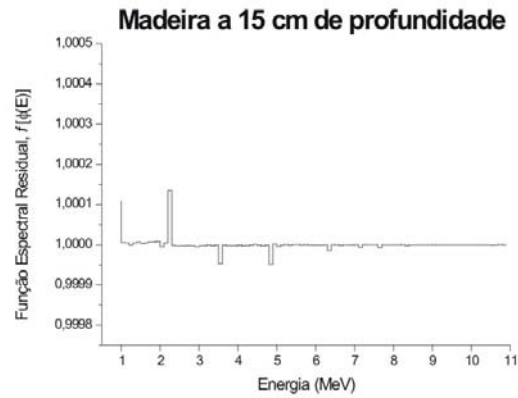
(a)



(b)

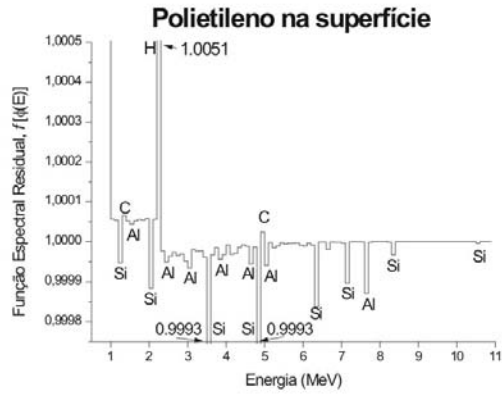


(c)

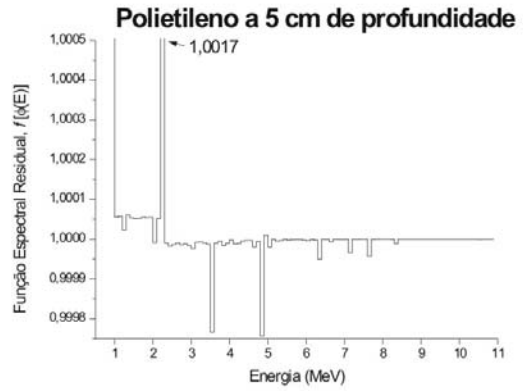


(d)

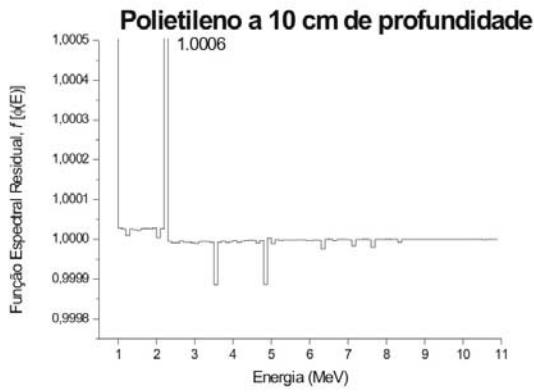
Figura 8 – Função espectral residual relativa à inclusão de madeira no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.



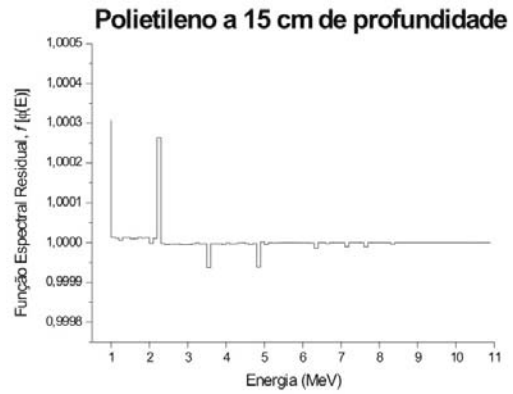
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9 – Função espectral residual relativa à inclusão de polietileno no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.

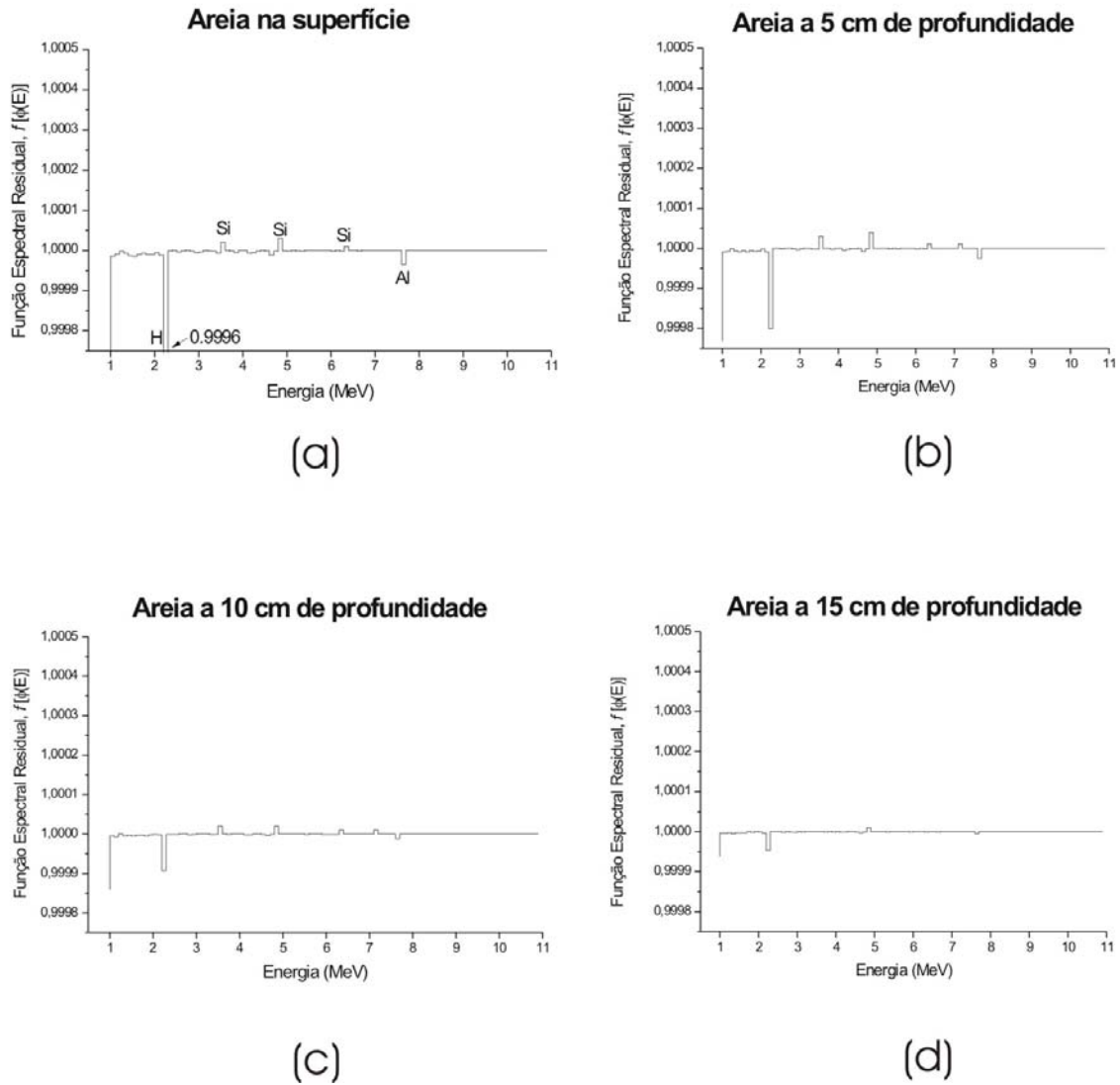
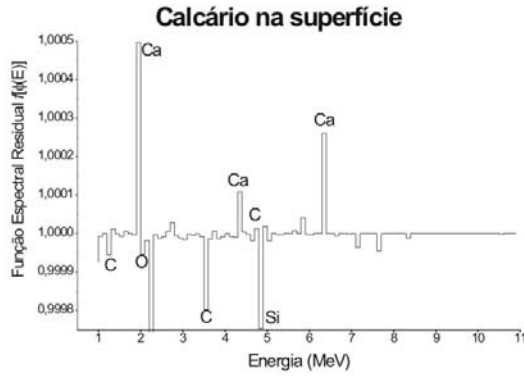
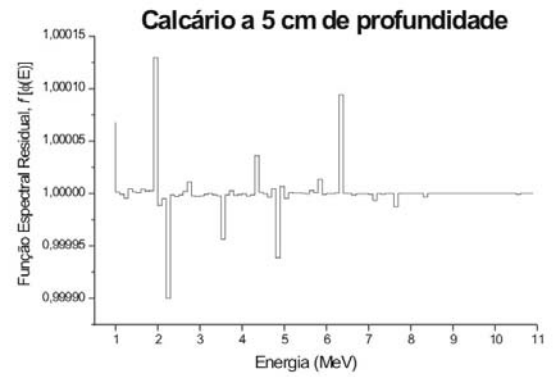


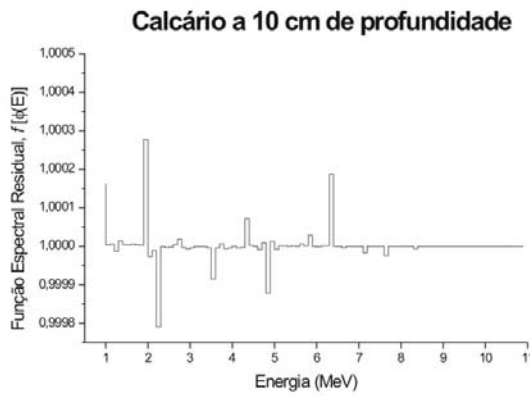
Figura 10 - Função espectral residual relativa à inclusão de areia no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.



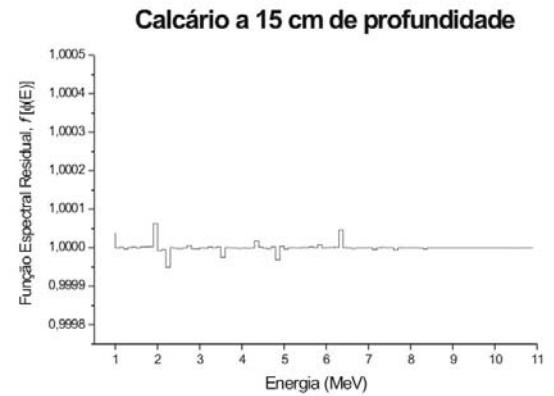
(a)



(b)

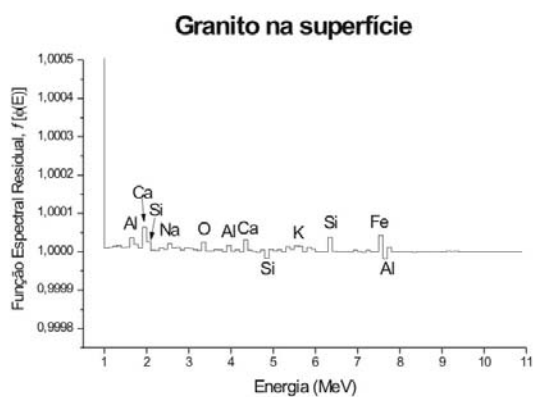


(c)

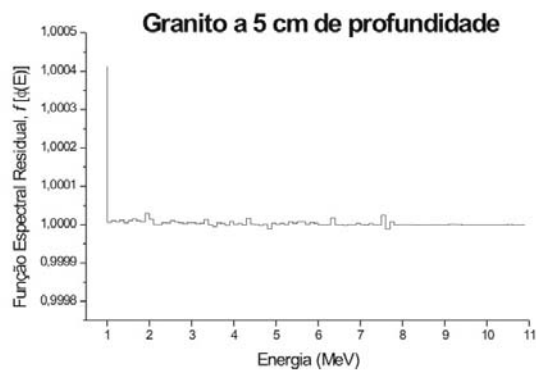


(d)

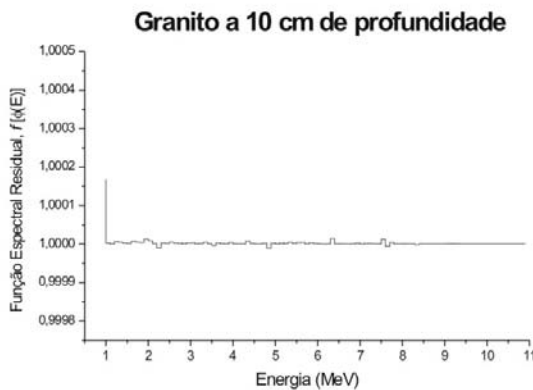
Figura 11 - Função espectral residual relativa à inclusão de calcário no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.



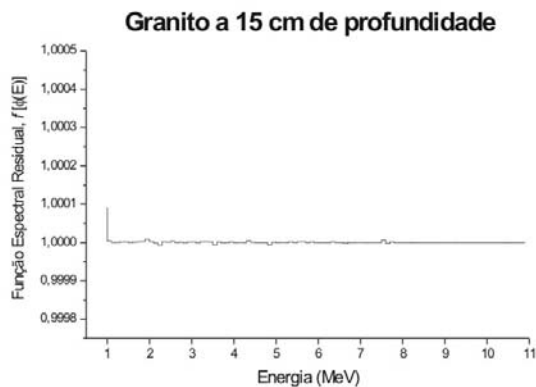
(a)



(b)

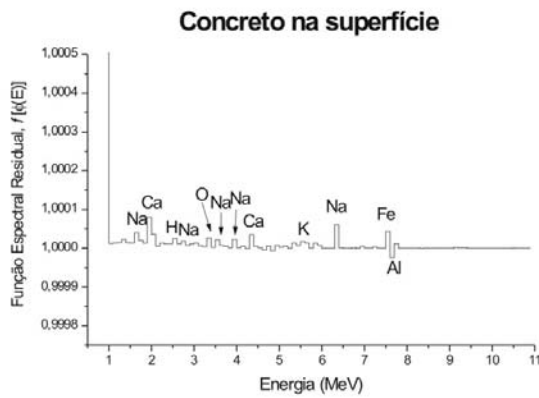


(c)

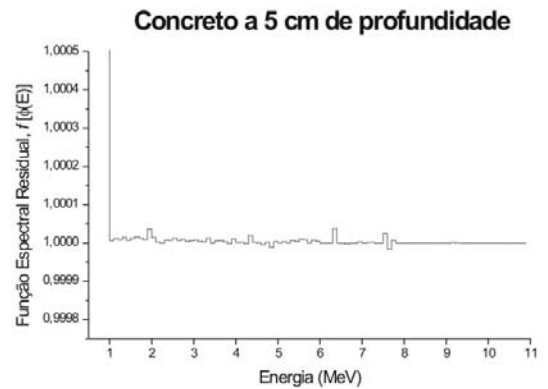


(d)

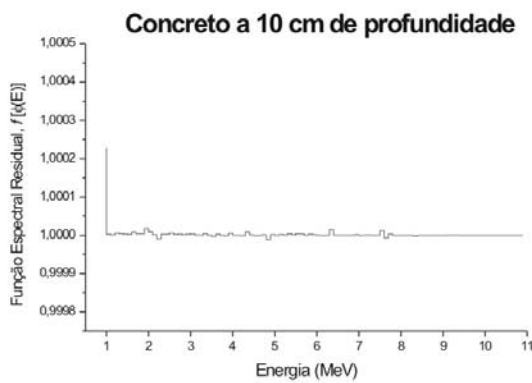
Figura 12 - Função espectral residual relativa à inclusão de granito no solo localizado nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.



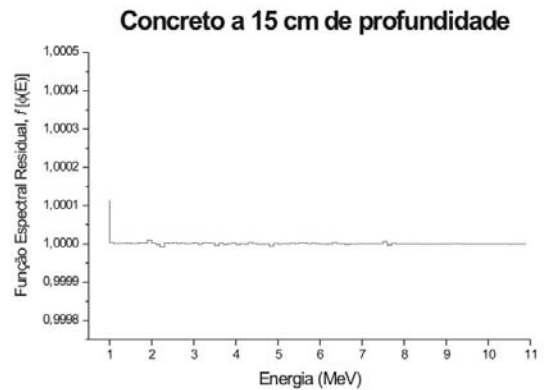
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 13- Função espectral residual relativa à inclusão de concreto localizado no solo nas seguintes posições: (a) superfície, (b) a 5 cm de profundidade, (c) a 10 cm de profundidade, (d) a 15 cm de profundidade.

IV.2 – Modelagem de um sistema semelhante ao real

Inicialmente, foram simulados casos que visavam otimizar o fluxo de nêutrons térmicos no local onde o explosivo se encontrava incluso no solo. Os resultados obtidos revelaram que os nêutrons são termalizados ao longo do percurso, durante a penetração no solo.

A figura 14 apresenta os valores de fluxos de nêutrons térmicos no local onde se encontra o explosivo, em função da profundidade da mina e da espessura de moderador. Esses resultados preliminares visaram calcular a espessura de moderador necessária para que o fluxo de nêutrons térmicos no local do explosivo seja o maior possível, variando-se a espessura de polietileno de alta densidade (PHD) de 1 a 8 cm, com incrementos de 0,5 cm, e a profundidade da mina de 5 a 25 cm, com incrementos de 5 cm.

Observa-se também que o fluxo de nêutrons térmicos, na região onde se encontra o explosivo é maior, quando a espessura do moderador é de 3,0 cm, para uma mina localizada a 5 cm e 10 cm de profundidade. Observa-se também que o fluxo de nêutrons térmicos, para uma mina localizada entre 15 e 25 cm de profundidade do solo, é maior quando a espessura de moderador é de 2,0 cm. Assim, optou-se por usar 2,0 cm como a espessura de moderador, que é satisfatória para ambos os casos.

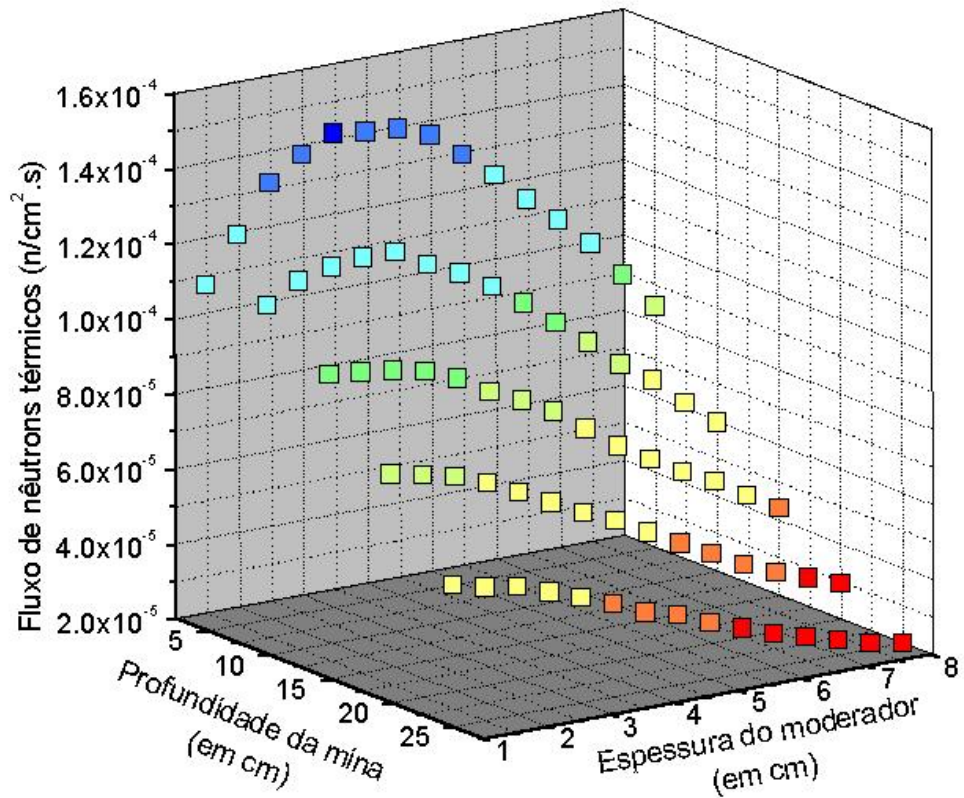


Figura 14 – Fluxo de nêutrons térmicos no explosivo.

A partir da escolha da espessura de polietileno, foram simulados casos onde se variou a profundidade da mina e a dos outros materiais constantes da tabela III.1, quando inclusos no solo. Como se pode ver na figura 15, elaborada com os materiais posicionados a 5 cm de profundidade, os espectros resultaram praticamente idênticos dificultando a sua distinção. Isto significa que o solo praticamente modera todos os nêutrons e emite raios γ característicos de seus núcleos. Os resultados referentes à variação da porcentagem de água no solo para a mina estão descritos a seguir. Entretanto, os gráficos para os demais materiais foram suprimidos por serem muito semelhantes, como se pode ver na figura 15.

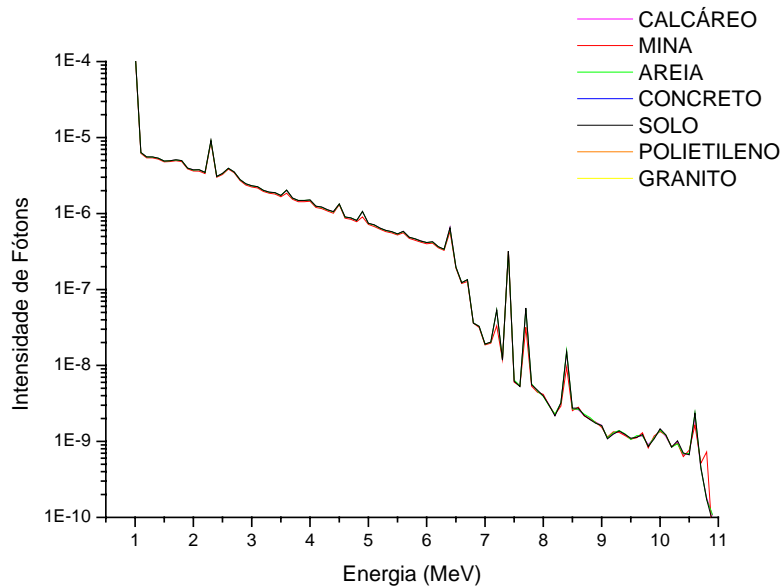
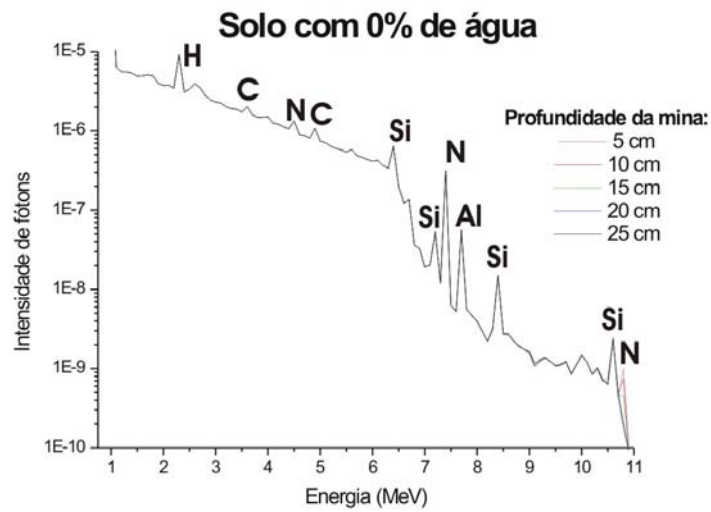


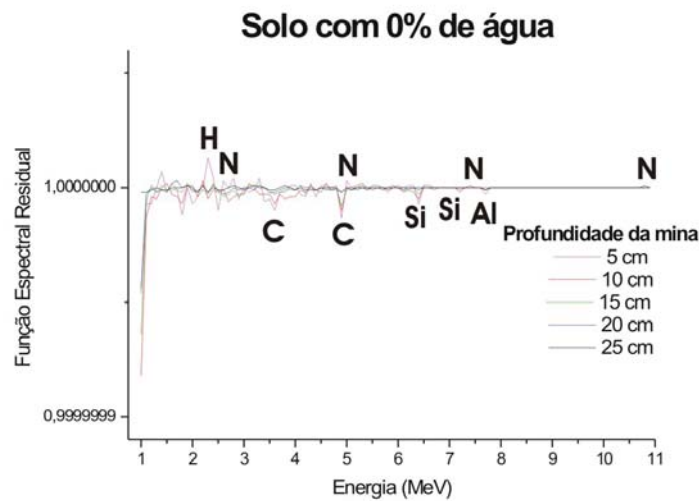
Figura 15 – Espectros de raios γ provenientes do solo e de diversos materiais a 5 cm de profundidade do solo.

A figura 16 mostra as semelhanças entre os espectros gama da mina nas diversas profundidades de 5 a 25 cm, com incrementos de 5 cm. Note-se que a intensidade do pico de 10,8 MeV, figura 16(a), referente à interação dos nêutrons com o átomo de Nitrogênio, diminui com a profundidade da mina o que dificulta a sua detecção pelo método de Análise por ativação para profundidades superiores a 25 cm. Nessa figura, a semelhança entre os espectros é possível de ser observada e, como já mencionado, há uma grande dificuldade no reconhecimento do espectro da mina enterrada no solo.

Assim como foi feito para as simulações preliminares do sistema ideal, aplicou-se a função espectral residual nos espectros do sistema semelhante ao real no intuito de se isolar a resposta espectral relativa à inclusão suspeita. Na figura 16 (b) apresentam-se os resultados da aplicação dessa função aos espectros da figura 16 (a). Com a aplicação da função, tornam-se visíveis algumas diferenças que podem ser relevantes para a determinação da presença ou não da mina no solo. Porém, essas diferenças são bem menos expressivas do que quando trabalhamos com o sistema ideal, o que já era esperado. As figuras 16 e 18 também apresentam assinalados os picos e vales mais importantes correspondentes aos materiais que compõem a mina (picos) e ao solo (vales).



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Espectros de raios γ provenientes da mina enterrada no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

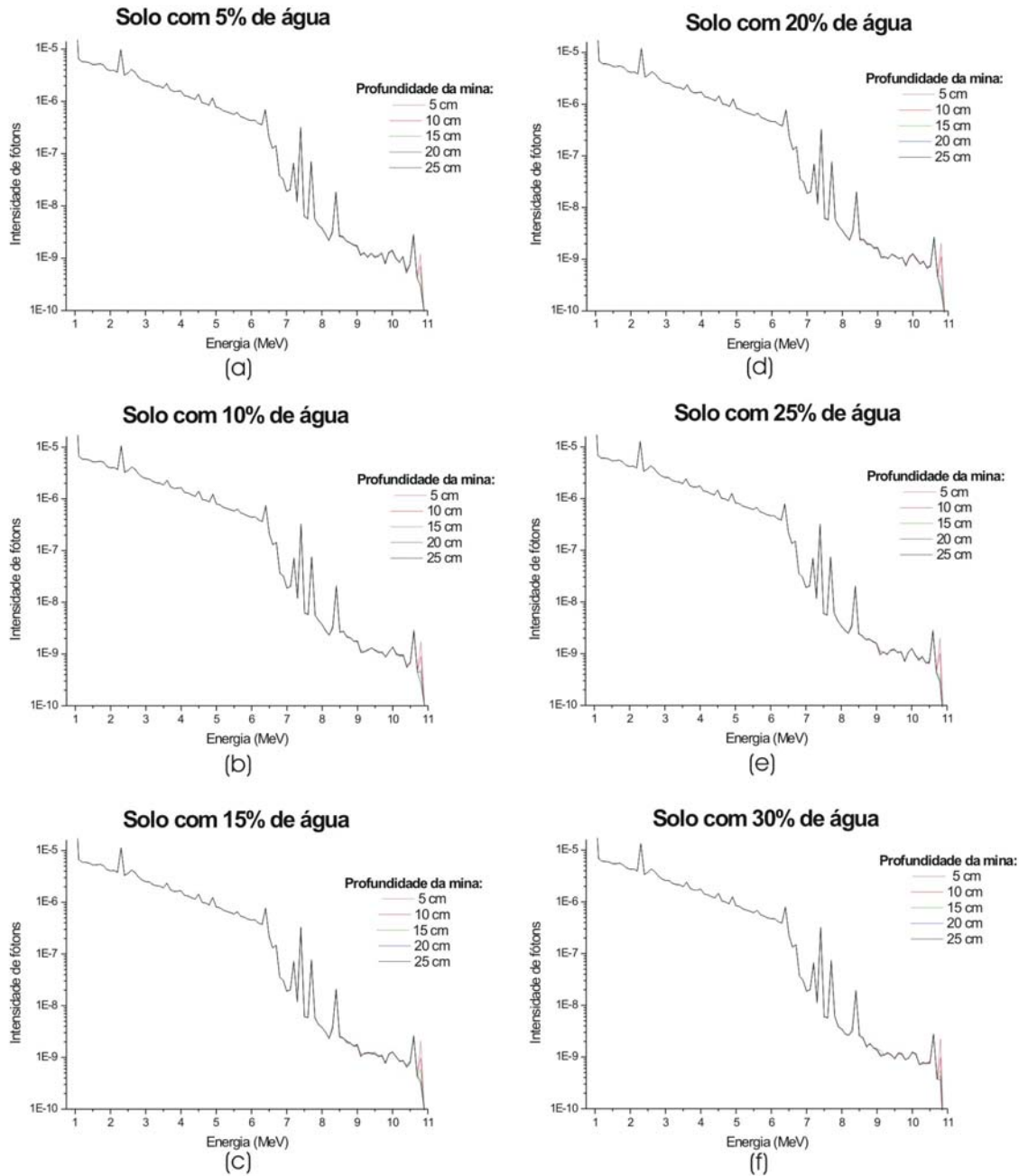


Figura 17 - Espectros de raios γ provenientes da mina enterrada no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

Na figura 17, pode-se perceber, mais uma vez, a grande semelhança entre os espectros contidos nela. Destacando-se apenas o pico de 10,8 MeV que diminui a sua

intensidade ao se aumentar a profundidade da mina, o que independe da porcentagem de água no solo.

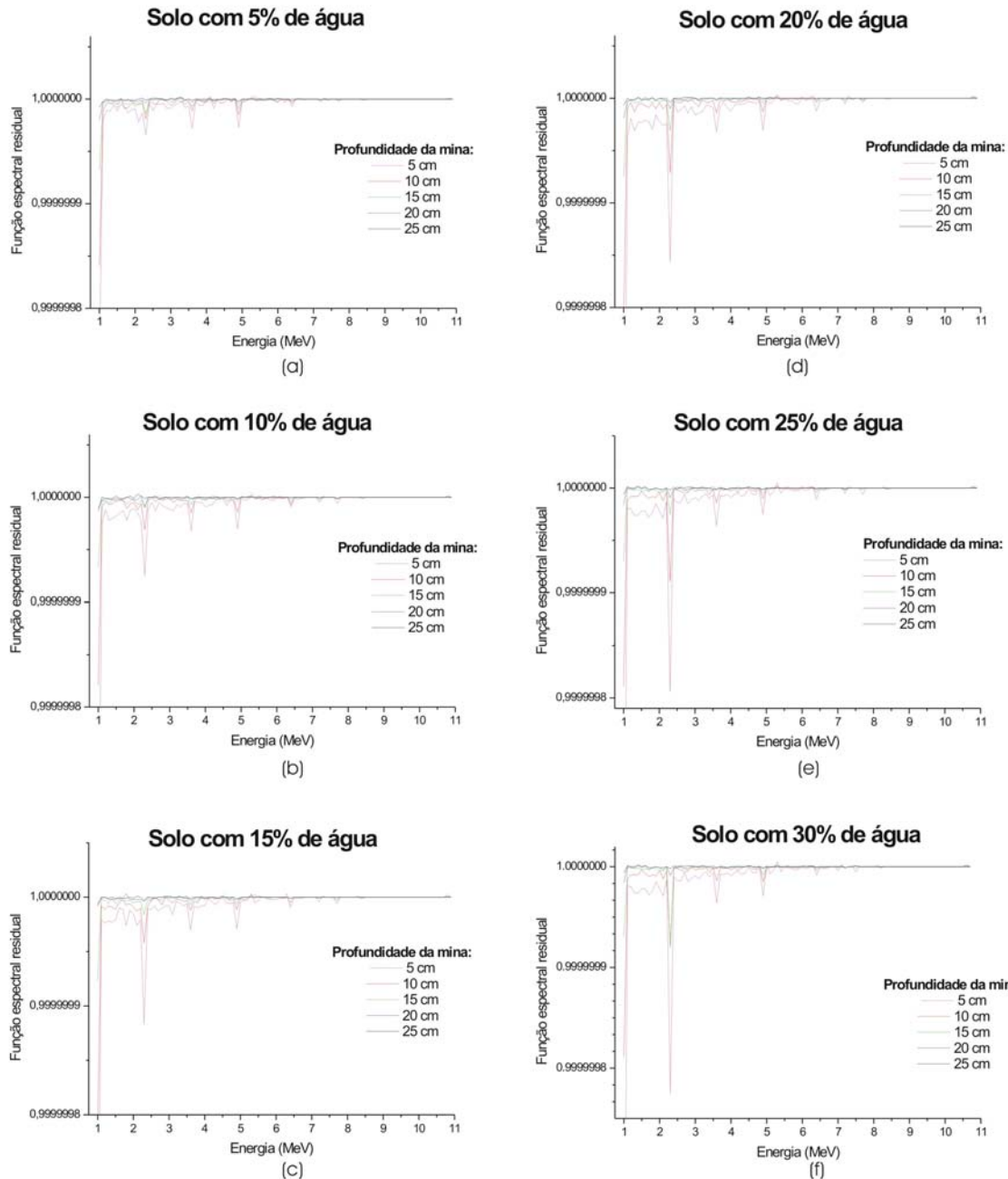


Figura 18 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura 17, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

Ainda na figura 18, pode-se constatar, o que já era esperado, que, ao se aumentar a concentração de água no solo, o vale em 2,2 MeV, referente ao hidrogênio, também aumenta, revelando que a função aplicada funcionou bem como um discriminador entre os componentes da mina e do solo gerando picos e vales de acordo com a concentração do material.

IV.3 – Aplicação de Redes Neurais na Interpretação dos Espectros Simulados

Esta secção foi subdividida em duas partes. A primeira retrata a aplicação das redes neurais aos dados simulados para o sistema ideal e a segunda, para o sistema semelhante ao real.

IV. 3.1 – Sistema Ideal

O algoritmo de redes neurais é aplicável em diversas áreas, principalmente, no que se refere ao reconhecimento de padrões. Por esse motivo, neste trabalho, aplicou-se redes neurais com a finalidade de se reconhecer o padrão da amostra de explosivo nos espectros gerados pelo MCNP.

A aplicação da técnica de análise por ativação ao sistema ideal mostrou-se eficiente. A rede foi capaz de identificar todas as substâncias ocultas no solo, inclusive, em diferentes profundidades. A rede neural apresentou a classificação correta da presença da mina (TNT) em todos dos casos testes. Outro fato importante que se deve destacar é que, como foram estudados quatro tipos diferentes de substâncias, ou seja, uma amostragem pequena, pouco se pode afirmar que essa mesma rede responderá corretamente a um grande

número de situações. Diante disso, esperou-se que ela fosse capaz de generalizar o reconhecimento dos espectros de outros materiais que podem ser encontrados no solo.

No item III.3, comentou-se que a rede neural aplicada para a identificação dos espectros de raios γ obtidos pelo código MCNP4B possui, na camada de entrada, 100 neurônios. Como já era esperado, dois dos neurônios, que possuíram os maiores pesos na tomada de decisão da rede, foram os associados às energias características dos fótons gama emitidos pelo núcleo de nitrogênio (1,67 MeV e 1,88 MeV), emitidos pela interação do nêutron com esse átomo (NUNES *et al*, 2000). Esses pesos referentes ao nitrogênio estão representados na figura 19. Essa atribuição de importância para o pico de nitrogênio reside no fato de que o explosivo apresenta uma considerável concentração dessa substância (19%), o que o difere dos demais materiais hidrogenosos. Entretanto, a madeira também possui átomos de nitrogênio, mas numa concentração muito menor, em relação ao número de átomos de carbono, o que favorece uma nítida distinção entre os espectros, notando-se mais esse fato, quando se aplica a função espectral residual.

Por outro lado, o neurônio 68 (que corresponde a 7,72 MeV) foi o principal fator que contribuiu para a tomada de decisão da rede na determinação da presença de todas as substâncias e corresponde à contribuição dos raios gama emitidos por átomos de alumínio presentes no solo.

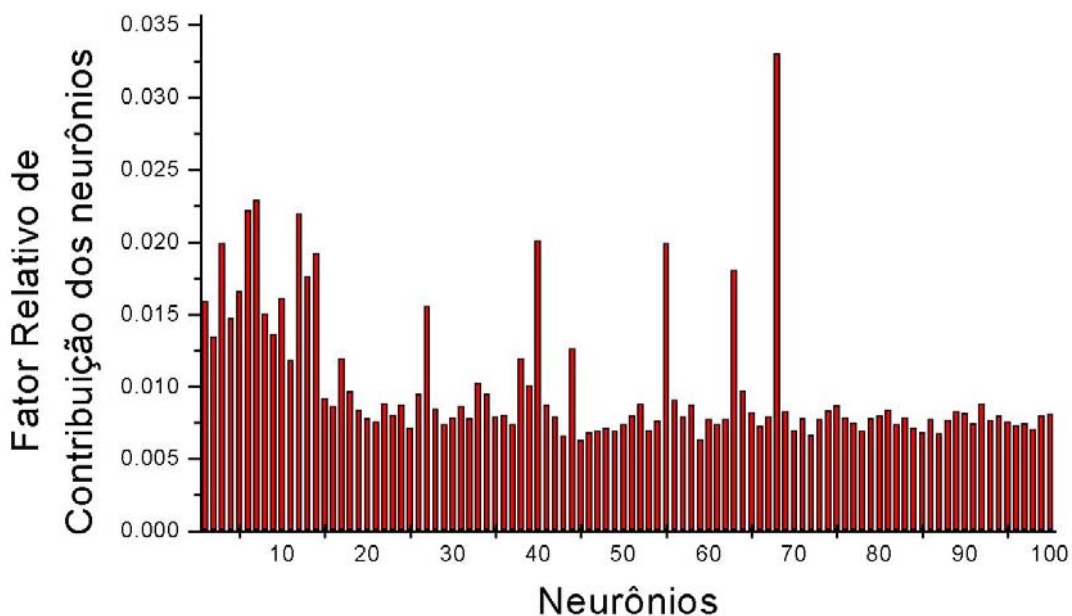


Figura 19 – Contribuição dos neurônios de entrada na decisão da rede neural.

Pode-se destacar, ainda na figura 19, algumas faixas de energia, representadas pelos neurônios de entrada da rede, que influenciaram bastante na tomada de decisão, embora seja evidente que todos os neurônios tenham participado dessa decisão.

Os espectros obtidos através da aplicação da técnica de ativação com nêutrons térmicos apresentam a “assinatura digital” de cada substância. Isso, na verdade, facilita o treinamento e o reconhecimento da rede neural, pois as características de cada material são únicas. Assim, quando se oculta explosivos, suas características permanecem presentes no espectro obtido, ou seja, os picos característicos de seus elementos constituintes servem para revelar sua presença (NUNES, 2002). Portanto, quando é possível fazer com que a

rede neural aprenda os padrões apresentados a ela, durante o treinamento, espera-se um bom desempenho na tarefa de reconhecimento.

IV. 3.2 – Sistema semelhante ao real

O NeuroShell 2.0 apresenta como opção de saída um gráfico relacionando o número do padrão de treinamento com o valor esperado de resposta da rede (entre 0 e 1). Na figura 20, pode-se observar estes gráficos, onde, no eixo horizontal, são apresentados o número dos padrões de treinamento que foram apresentados para treinamento, teste e produção da rede. A correlação entre o números do padrão de treinamento e seu material correspondente pode ser visto na tabela VI.1.

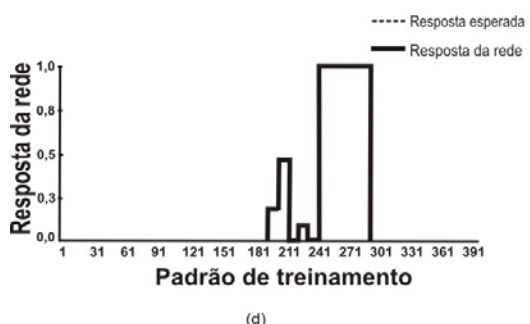
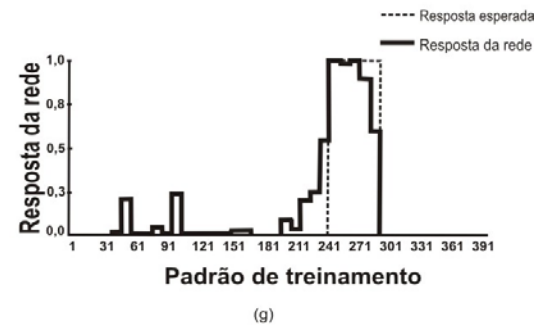
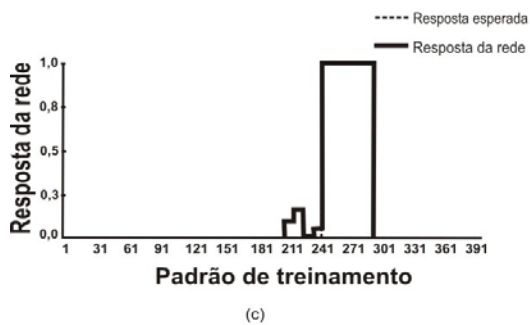
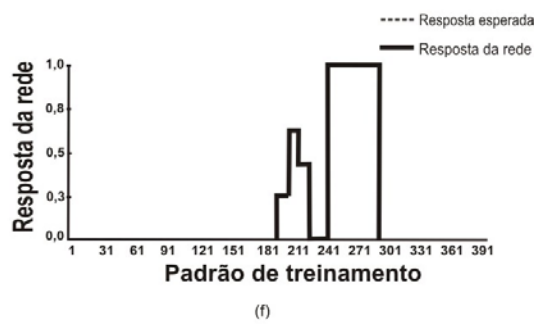
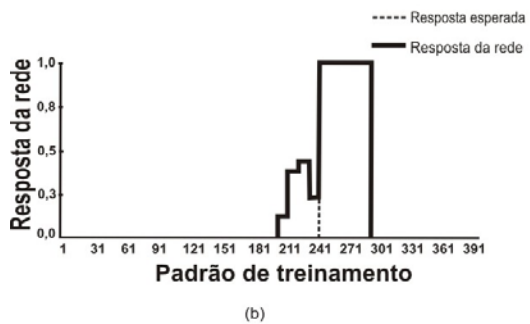
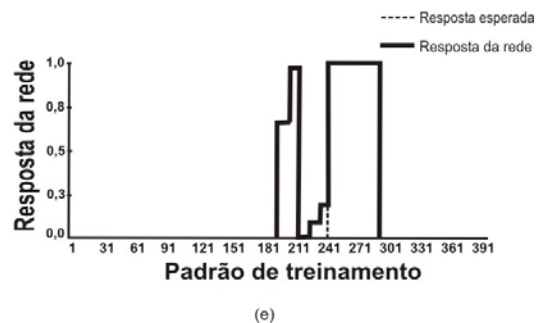
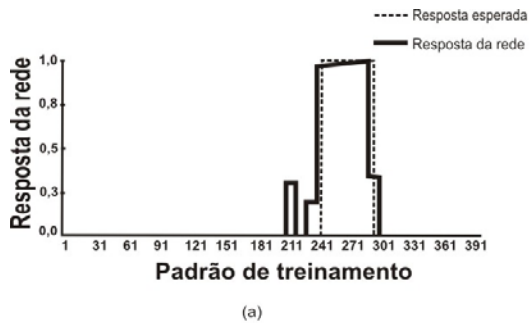


Figura 20 – Resposta da rede para o espectro da mina, com a aplicação da função espectral residual. (a) solo com 0% de água, (b) solo com 5% de água, (c) solo com 10% de água, (d) solo com 15% de água, (e) solo com 20% de água, (f) solo com 25% de água e (g) solo com 30% de água.

Tabela VI.1- Relação entre o número do padrão de treinamento com o material correspondente .

Número do padrão de treinamento	Material
1-50	Areia
51-100	Cálcio
101-150	Concreto
151-200	Granito
201-250	Madeira
251-300	Mina
301-350	Polietileno
351-400	Solo

As figuras 20 e 21 comparam a resposta esperada com a da rede, para o reconhecimento do espectro padrão da mina, relativamente aos diversos acréscimos de água no solo, entre 0% e 30%, utilizando-se a função espectral residual e não fazendo uso dela, respectivamente. Verificou-se também o que já era esperado, ou seja, o espectro que se confundiu com o da mina foi o da madeira, devido à composição química semelhante. Quando a rede foi treinada com todos os materiais ela reconheceu a mina em todos os casos testes. Em seguida, procuramos treinar a rede para o caso mais difícil, onde o espectro de madeira serviu apenas para a produção da rede. Nesse caso, em que os espectros de madeira, que não foram para o treinamento e teste da rede, ou seja, não pertenciam ao seu universo de conhecimento, deveriam ser naturalmente confundidos com o espectro da mina,

o que realmente aconteceu como mostram as figuras 20 e 21. Além disso, a semelhança entre esses espectros geraria apenas falsos-positivos, o que não seria um problema para declarar um campo, anteriormente minado, como limpo. Mas, em cada caso, pode-se notar que a resposta para o padrão da mina foi, em geral, o esperado, o que significa, praticamente, a ausência de falsos-negativos. É importante ressaltar que, no caso de se empregar o sistema em casos reais, serão utilizados, para o treinamento da rede, os espectros de madeira, o que diminuirá sensivelmente os falsos-positivos. Este fato favorece a um índice menor para a probabilidade de acerto no reconhecimento do padrão da mina, principalmente, nos espectros de solos com 20%, 25% e 30% de água. Isso ocorre devido às interações dos nêutrons com os átomos de hidrogênio, elemento espalhador de nêutrons, que foram adicionados ao solo com o acréscimo de água, aumentando o ruído desses espectros.

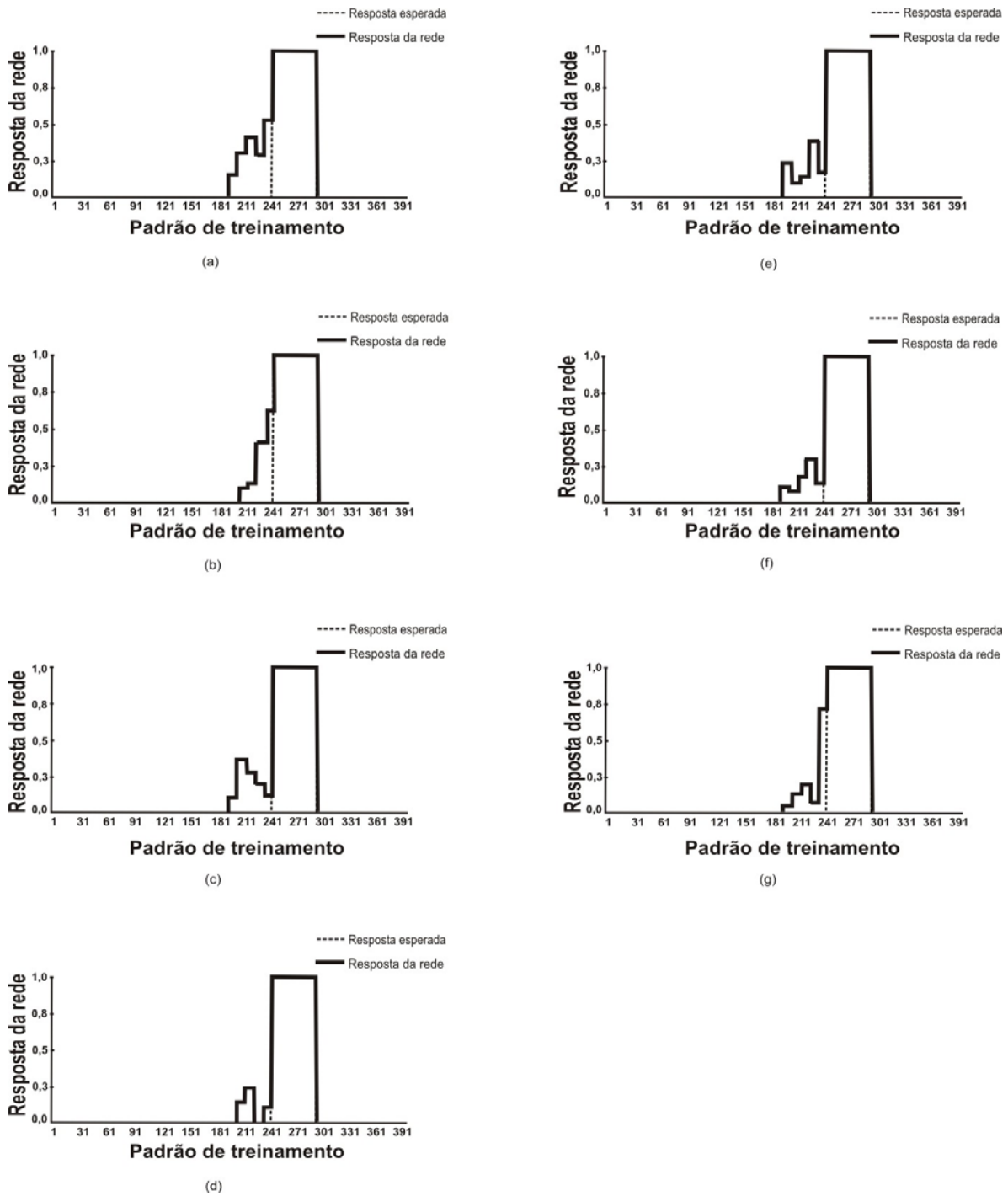


Figura 21 – Resposta da rede para o espectro da mina, sem se aplicar a função espectral residual. (a) solo com 0% de água, (b) solo com 5% de água, (c) solo com 10% de água, (d) solo com 15% de água, (e) solo com 20% de água, (f) solo com 25% de água e (g) solo com 30% de água.

A figura 22 apresenta a probabilidade de reconhecimento do padrão do espectro da mina em relação à porcentagem de água no solo. Nesta figura, encontramos 68,20% de probabilidade de reconhecimento do padrão da mina para solo com 20% de água, para espectros com aplicação da função espectral residual, um valor discrepante em relação aos demais. Isso ocorreu pelo fato de que os espectros de 20% de água apresentados à rede não possuíam um comportamento semelhante aos demais; para uma mesma energia, ora apresentam picos, ora vales, como mostrado na figura 18. Nela, verificamos que picos ou vales não apresentam comportamentos semelhantes entre si, diferentemente do que ocorreu com os espectros obtidos para as demais porcentagens de água. Por outro lado, a figura 20(e) apresenta a resposta da rede para o espectro da mina com a aplicação da função espectral residual. Nela pode-se observar, para os padrões de treinamento no intervalo de 201 a 250, que representam os espectros referentes à madeira, que a rede confundiu-se na identificação desses padrões com os da mina. Entretanto, como no sistema a ser aplicado numa situação real, o padrão de madeira será utilizado com o treinamento da rede, este problema será minimizado naturalmente. As figuras 20 (f) e (g) também mostram que a rede confundiu o espectro de madeira com o espectro da mina, causando, mais uma vez, uma probabilidade menor (85,71% e 85,29%, respectivamente) para o reconhecimento do padrão da mina.

Como se pode ver nas figuras 22 e 23, a intensidade do fluxo de nêutrons térmicos no solo está diretamente relacionada com a probabilidade de reconhecimento do padrão da mina. Por exemplo, um solo com 0% de água apresenta a melhor intensidade de fluxo de nêutrons térmicos (da ordem de $1,25 \times 10^{-4}$ n/cm².s) para as diferentes profundidades da mina, o que favorece espectros ainda mais semelhantes,

causando uma probabilidade de reconhecimento da mina menor (81,49% e 85,50%). Já na faixa intermediária, entre 5% e 25% de água, a intensidade do fluxo de nêutrons térmicos é maior, favorecendo uma diferenciação melhor entre os espectros estudados e, conseqüentemente, o reconhecimento melhor do padrão da mina. Já no caso do solo com 30% de água, encontrou-se um fluxo de nêutrons térmicos mais alto (maior que 2×10^{-4} n/cm².s) para as profundidades de 5 cm e 10 cm e um fluxo mais baixo (igual ou menor a 5×10^{-5} n/cm².s), para as profundidades de 20 cm e 25 cm. Nas profundidades de 5 cm e 10 cm, resultam espectros mais detalhados que permitiram a diferenciação entre os espectros da mina e os demais. Por outro lado, nas profundidades de 15 cm a 25 cm, os espectros pouco facilitaram a distinção do espectro da mina, em relação aos demais materiais, e, no treinamento da rede, formaram um conjunto de espectros muito semelhantes aos outros, mas com uma indicação de treinamento como sendo da mina. Por este motivo, a rede teve dificuldade na aprendizagem desse padrão.

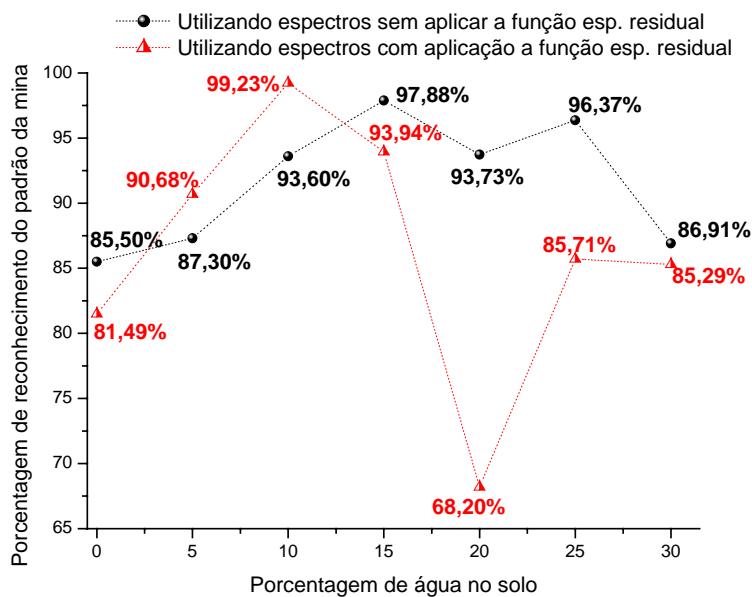


Figura 22 – Probabilidade de reconhecimento do espectro da mina em relação à porcentagem de água no solo.

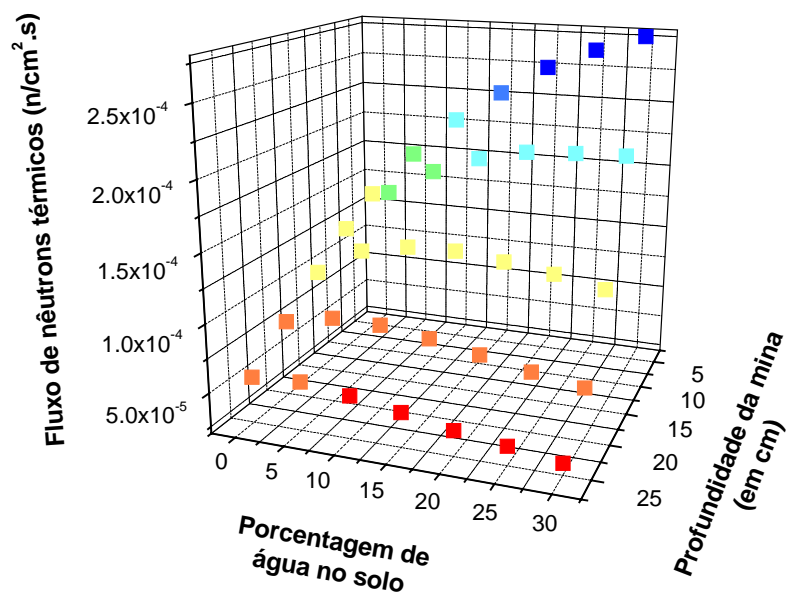


Figura 23 – Fluxo de nêutrons térmicos em relação à porcentagem de águas no solo e a profundidade da mina no solo.

Em um solo com baixa porcentagem de água (5% a 10%) o emprego da função espectral residual apresentou melhores resultados na caracterização do padrão da mina, para os espectros apresentados no treinamento da rede neural com a madeira, sendo utilizada apenas no arquivo de produção. Por outro lado, para solos com uma maior concentração de água, os espectros da análise por ativação com nêutrons térmicos sem aplicar a função espectral residual foram suficientes para o treinamento da rede neural e apresentou excelentes resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou desenvolver um modelo para detectar minas terrestres, através da técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos, aliada ao algoritmo de redes neurais, que foi o responsável pela decisão sobre a presença ou não do explosivo oculto no solo, em diferentes profundidades, de acordo com as respectivas modelagens simuladas pelo código MCNP.

Os dados gerados pelo MCNP proporcionaram maior facilidade na obtenção do número de casos estudados neste trabalho e alta confiabilidade. Dessa forma, foi possível simular um número maior de casos para treinar a rede neural.

Uma alternativa capaz de solucionar o problema de semelhança entre os espectros da mina e de outros materiais enterrados no solo consistiu da utilização da função espectral residual sobre os espectros obtidos pela técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos, pela qual os raios γ característicos representam o registro da “impressão digital” da mina. Por esse motivo, cada espectro que representava a presença da amostra de explosivo continha informações suficientes para sua determinação pela rede neural. Nesse caso, a rede demonstrou ter “aprendido” o padrão que determina a presença de TNT, mesmo em profundidades diferentes (até 25 cm).

Assim, diante dos resultados obtidos com a totalidade de identificação da presença da mina, pode-se afirmar que a rede neural, aliada à análise por ativação com nêutrons térmicos, se aplica perfeitamente à detecção de minas terrestres para um sistema idealizado.

Para um sistema simulado semelhante ao real, foram encontrados bons resultados (acima de 80%), tanto se aplicando a função espectral residual (para o solo com 5% ou 10% de água), quanto se aplicando diretamente à rede os espectros obtidos pelo programa computacional MCNP. É importante ressaltar que os espectros da madeira serviram apenas para o arquivo de produção da rede, influenciando diretamente nesse resultado. Pela análise dos gráficos, ficou evidente que, nas condições estudadas nesse trabalho, o erro da rede neural geraria apenas falsos positivos, o que não representaria arriscado um sistema ser posto em operação, ao se certificar que o campo estaria isento da presença da mina.

É importante ressaltar como uma possível limitação da técnica que a aplicação da função espectral residual nos solos com 20% de água podem causar a confusão entre os espectros de mina e de madeira resultando em falsos positivos.

O desafio para o emprego de técnicas com radiação não reside unicamente no desenvolvimento de mecanismos que possam responder ao que é exigido pelo problema de detecção, mas de adequar também tais técnicas às circunstâncias locais. Apesar de tudo, detectar minas terrestres no deserto arenoso do Egito ou do Kuwait é muito diferente do que encontrá-las no solo fértil do Vietnam ou do Laos. No geral, pode-se indicar o seguinte:

i) as técnicas que empregam radiação têm a habilidade original de identificar a presença dos explosivos em comparação aos outros métodos.

ii) As minas terrestres enterradas numa profundidade acima de 25 cm podem causar problemas futuros, porque são difíceis de se detectar.

iii) É pouco provável que uma única tecnologia de detecção será suficiente para se detectar a mina em todas as circunstâncias.

iv) O desenvolvimento de um sistema que tenha uma possibilidade mínima para ser implementado requer que ele possua um custo aceitável, seja fácil de se operar e de se manter, seja seguro e forneça resultados num tempo razoável.

Como sugestão para a continuidade desse trabalho e conseqüente enriquecimento do tema, destacam-se:

i – Deve-se utilizar o reator Argonauta antes de se construir um sistema em tempo real móvel, semelhante ao proposto nesse trabalho, para se verificar a aplicabilidade da análise por ativação com nêutrons térmicos aliada a rede neural numa situação real.

ii – No intuito de se aplicar a técnica de redes neurais aliada à análise por ativação com nêutrons, em sistemas de inspeção em tempo real, deve-se criar um código em linguagem do tipo Visual Basic, que permita a interface com a rede treinada pelo NeuroShell.

iii – Na programação do sistema em tempo real deve aliar a rede treinada com a aplicação da função espectral residual e a rede sem a aplicação desta função para produzirem juntas uma resposta mais confiável sobre a determinação da presença ou não de uma mina no solo.

iv - Elaborar trabalhos variando o tipo de solo (solos agrícolas, desérticos, etc.)

v- Desenvolver trabalhos variando o tipo de mina (por diferentes explosivos: C4, TNT combinado, etc; por encapsulamento diferente madeira, plástico, metal, etc.)

vi - Pesquisar a aplicação das técnicas para a agentes químicos e biológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHLEY, S., 1996, “Searching for land mines”, *Mechanical Engineering*, v. 118, n. 4, p. 62.

AUBIN, J. P., 1996, *Neural Networks and Qualitative Physics*, 1 ed. Cambridge University Press.

BERGER, H., 1963, “Resolution Study of Photographic Thermal Nêutrons Image Detectors”, *Appl. Physics*, v. 34, pp. 914-918.

BESSA, A., 1996, *Estudo da Tomografia com nêutrons na análise de solos compactos*, Tese de Mt. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

BRADY, N., 1984, *The nature and properties of soils*, 9a. ed., Macmillan Publishing Company. New York.

BRAZ, D. *et al.*, 2001, “Evaluation of scatter-to-primary ratio in soil CT-imaging”, *Radiation Physics and Chemistry*, v. 61, pp. 747-751.

BREISMEISTER, J. F., 1986, *MCNP – A General Monte Carlo for Nêutron and Photon Transport – version 3A*, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA-7396-M, Rev. 2.

BREISMEISTER, J. F., 1997, *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA-12625-M

BROOKS, F., BUFFER, A., ALLIE, M., BHARUTHRAM, K., NCHODU, M. e SIMPSON, B., 1998, Determination of HCNO Concentrations by Fast-neutron Scattering Analysis, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A*, v. 410, 319-328.

BROW, D. R. e GOZANI, T., 1997, "Cargo inspection system based on pulsed fast neutron analysis", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. B99, pp. 753 – 756.

BROWN, D. R. E GOZANI, T., 1996, *Nuclear Imaging Technologies*, SAIC Science and Technology Trends - pp.1-16.

CAFFREY, A., COLE, J., GEHRKE, R. e GREENWOOD, R., 1992, "Chemical Agent and High Explosive Identification by Spectroscopy of Neutron-Induced Gamma Rays", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 39, pp. 1422-1426.

CAMPBELL, J. e JACOBS, A., 1992, Detection of Buried Land Mines by Backscatter Imaging, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 110, 417.

CHRISTOPHER, C., 1981, *Engineering Geology*, Merrill Publ., Columbus, Ohio.

CHUNG, C. *et al.*, 1993, "Feasibility Study of Explosive Detection for Airport Security Using a Neutron Source", *Applied Radiation and Isotopes*, v.44, no. 12, pp. 1425-1431.

COUSINS, T. *et al.*, 1998, “The development of a thermal neutron activation (TNA) system as a confirmatory non-metallic land mine detector”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 235, pp.53-58.

CRISPIM, V. R., 1993, *Desenvolvimento de Ensaaios Não-Destrutivos com Neutronografias*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CSIKAI, J., DÓCZI, R. and KIRÁLY, B., 2004, “investigations on landmine detection by neutron-based techniques”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 61, pp. 11-20.

DA SILVA, A., 1999, *Uso de um feixe de Nêutrons Térmicos para a Detecção de Narcóticos e Explosivos por Tomografia, para Aplicação na Segurança Pública Nacional*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DOMANUS, J. C., 1992, *Practical Neutron Radiography*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland.

DUDERSTADT, J. J. And HAMILTON, L. J., 1976, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley and Sons.

GAO/NSIAD, 1996, *Terrorism and Drug Trafficking: Technologies for Detecting Explosives and Narcotics*. GAO/NSIAD/RCED-96-252, Set, Washington, USA.

GARDNER, R. *et al.*, 2000, “NaI detector neutron activation spectra for PGNAAs applications” *Applied Radiation and Isotopes*. v. 53, pp. 483-497.

GOKHALE, P. P. e HUSSEIN, M. A., 1997, “A ^{252}Cf Neutron Transmission Technique for Bulk Detection of Explosives”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 48, n. 7, pp. 973-979.

GOMBERG, H. and KUSHNER, B., 1991, Neutron elastic scatter (NES) for explosive detection systems (EDS), Proc. First Int. Symposium on Explosive Detection Technology, S. Khan, Ed., DOT/FAA/CT-92/11, FAA Technical Center, Atlantic City, NJ, 123.

HACIDUME, L.R., 1999, *Detecção de explosivos plásticos por neutrografia térmica*, Tese de M. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HAWKESWORTH, M. R., 1977, *Neutron Radiography: Equipment and Methods*, In: Atomic Energy Review, v.15, n.2, p.169-218.

HAYKIN, S., 1999, *Neural Networks: a comprehensive Foundation*, 2 ed. New Jersey, Prentice Hall.

HENDRICKS, J. S. *et al.*, 2000, “Present and future capabilities of MCNP”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 53, pp. 857-861.

HUSSEIN, E., DESROSIERS, M. e WALLER, E., 2005, “On the use of radiation scattering for the detection of landmines”, *Radiation Physics and Chemistry*, v. 73, pp.7–19.

HUSSEIN, E. e WALLER, E., 1998, “Review of One-Side Approaches to Radiographic Imaging for Detection of Explosives and Narcotics”, *Radiation Measurements*, v. 26, pp. 581-591.

HUSSEIN, E. e WALLER, E., 2000, “Landmine Detection: The Problem and the Challenge”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 53, pp. 557-563.

HUSSEIN, E., 1992, “Detection of explosive materials using nuclear radiation: a critical review”, Proc. Conf. on The Aviation Security Problem and Related Technologies, W.H. Makky, Ed., SPIE, v.. CR42, p. 126.

HUSSEIN, E., 1994, “ Inspection of Luggage using Gamma Radiation”, Proc. Cargo Inspection Technologies, Lawrence, A.H., Ed., The International Society for Optical Engineering, San Diego, California, v. 2276, pp. 321-325.

IAEA,1998, Detection of Explosives (in particular landmines) by Low Cost Methods, IAEA/PS/AGM97-3, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

ICRC, 1996, *Anti-personnel Mines: an overview*.

KING, C., 1998, “Demining Enhancing the Process”, IEE Second International Conference on the Detection of Abandoned landmine, IEE Conference Publication, n. 458, Edinburgh, Reino Unido.

KNAPP, E. A., 2000, “Direct imaging of explosives”, *Applied Radiation and Isotopes*,

v. 53, pp.711-716.

LAMARSH, J. R., 1978, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing Company.

MANUAL, 1993 – *NeuroShell2*, Ward Systems Group Inc.

MAUCEC, M. e MEIJER, R., 2002, “Monte Carlo simulations as a feasibility tool for non-metallic land-mine detection by thermal-neutron backscattering”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 56, pp. 837-846.

MILLER, T. G. *et al.*, 1996, “Contraband identification in sealed containers using neutron transmission”. 5. World Conference on Neutron Radiography, Berlin, 17-20 march.

MILLER, T. G., 1994, “Use of neutron tomography for airline security”, *SPIE*, v. 2093, n. 2 (Feb), pp. 204-217.

NEBBIA, G., 2001, “DIAMINE (Detection and Imaging of Anti-personel Land mines by Neutron Backscattering Technique).”

NUNES, W. *et al*, 2002, “Explosives detection using prompt-gamma neutron activation and neural networks”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 56, 937-943.

NUNES, W., CRISPIM, V., XAVIER, A. e SCHIRRU, R., 2000, “The use of artificial

neural network for illicit substances identification”. In *Proceedings of International Conference On Explosives and Drug Detection Techniques*. pp.123-127, Crete (Greece), jul.

PALOMBA, M., D'ERASMO, G., PANTALEO, A., 2001, “Applications of the CSSE code: a Monte carlo analysis of the pile-up for NaI detectors employed in TNA sensors”, *INFN and Dipartimento di Física dell'Università, Bari*

PAZIRANDEH, A., AZIZI, M. e MASOUDIA, S., 2006, “Monte Carlo assessment of soil moisture effect on high-energythermal neutron capture gamma-rayby ^{14}N ”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 64, 1-6.

PETERS, Jr., L., DANIELS, J. e YOUNG, J., 1994, “Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool”, *Proc. of the IEEE*, v. 82, p. 1802.

PESENTE , S. *et al*, 2001, “Effects of soil moisture on the detection of buried explosives by radiative neutron capture”, *Nuclear Instrument Methods in Physics Research*, v. A 459, pp. 577-580.

RODER, F, 1975, Theory and Application of X-ray and Gamma-ray Backscatter to Landmine Detection, Report No. 2134, U.A. Army Mobility Equipment Research and Development Center, Fort Belvoir, Virginia.

SAIC- Science Applications International Corporation,1996, “Fast Neutron Analysis”, disponível na Internet via <http://www.saic.com/gov/advnucl/fna.html>, arquivo

consultado em 18/02/1997.

SAKAMOTO, L., 1999, “Guerrilha sem fim”, *Revista ISTOÉ*, n. 1573, pp. 150-154.

SAWA, Z. and GOZANI, T., 1991, “ PFNA technique for the detection of explosives”, Proc. First Int. Symposium on Explosive Detection Technology, S. Khan, Ed., DOT/FAA/CT-92/11, FAA Technical Center, Atlantic City, NJ, 83.

SOHRABPOUR, M. *et al.*, 1999, “Borehole prompt gamma neutron activation and comparison with Monte Carlo simulation using MCNP code Borehole PGNAA experiment comparison with MCNP”, *Applied Radiation and Isotopes*, n. 50, pp. 805-810.

TAFNER, M., XEREZ M. e FILHO L., 1996, *Redes Neurais Artificiais, Introdução e Princípios de Neurocomputação*, 1 ed. EKO Editora.

TANG, S. e HUSSEIN, E., 2004, “Use of isotopic gamma sources for identifying anti-personnel land mines”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 61, pp. 3-10.

VIESTI, G., 2001, “The DIAMINE (Detection and Imaging of Anti-personal landmine by neutron backscattering technique) project”. IAEA CRP Meeting St. Petersburg – Russia.

VITORELLI J., *et al.*, 2005, “Monte Carlo simulation of response function for a NaI(Tl) detector for gamma rays from $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ source”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 62, pp. 619-622.

VOURVOPOULOS, G. e WOMBLE, P., 2001, “Pulsed fast/thermal neutron analysis: a

technique for explosives detection”, *Talanta*, v. 54, pp. 459-468.

VOURVOPOULOS, G., DEP, L., PASCHAL, J. and SPICHIGER, G., 1997, “PELAN-A Transportable, Neutron-Based UXO Identification Technique”, Proceedings of UXO Forum'97, Nashville, TN, 342-349.

WALLER, E., 1998, MineSCANS – Mine System Countermeasures by Analysis of Nitrogen Signature, presented at the 1998 International Advanced Studies Institute Science and Technology Series, Monterey, CA.

YANCH, J.C. *et al.*, 1992, “Physically realistic Monte Carlo simulation of source, collimator and tomographic data acquisition for emission computed tomography”, *Physics Medical Biology*, v. 37, n. 4, pp. 853-870.

YOSHIKAWA, K, 2005, “Research and development of a compact fusion neutron source for humanitarian landmine detection”. In *Proceedings of 20th IAEA fusion energy conference 2004*, pp. 3451-3458, Villamoura, Portugal, jan.

ZUIN, L. *et al.*, 2000, “Experimental optimization of a moderated ^{252}Cf source for land mine detection”, *Nuclear Instrument Methods in Physics Research A*, v. 449, pp. 416-426.

APÊNDICE A

Para os cálculos das taxas de dose de nêutrons oriundos de uma fonte pontual de Cf^{252} , o espectro de energia dos nêutrons foi modelado como um espectro de *fissão Watt*, descrito pela equação A.1 usando coeficientes fornecidos pelo código MCNP (BRIESMEISTER, 1997).

$$f(E) = C \cdot e^{\frac{-E}{a}} \cdot \sinh \sqrt{b \cdot E} \quad \text{A.1}$$

Onde E é a energia dos nêutrons em MeV, $a = 1,025 \text{ MeV}$ e $b = 2,926 \text{ MeV}^{-1}$ e $C = 0,30033$.

A figura A1 apresenta o gráfico do espectro de nêutrons da fonte de Cf^{252} , obtido a partir da equação A1.

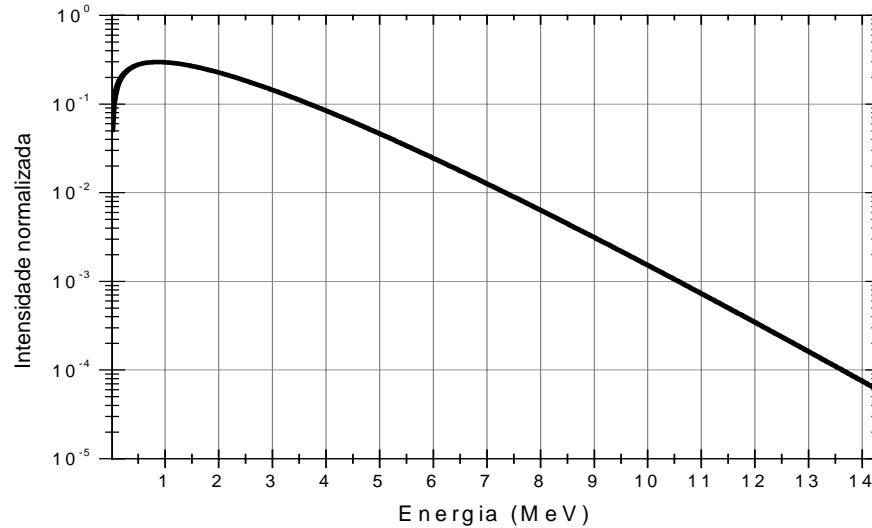


Figura A1 – Espectro de nêutrons da fonte de Cf^{252} .

APÊNDICE B

Os Principais gamas prontos provenientes da interação de nêutrons térmicos com os materiais utilizados nesse trabalho estão apresentados na tabela A1.

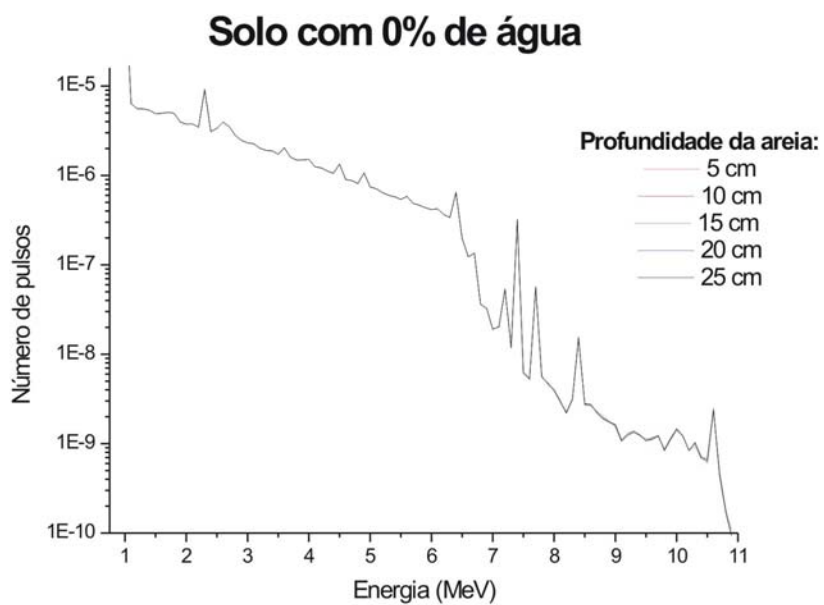
Tabela A1 - Principais gamas prontos provenientes da interação de nêutrons térmicos

	Elemento	Energia (MeV)	Probabilidade de interação (%)
1	Hidrogênio (H)	2,22	100,00
2	Oxigênio (O)	1,09	82,00
		2,18	82,00
		3,27	18,00
3	Carbono (C)	1,26	43,66
		3,68	47,46
		4,95	100,00
4	Nitrogênio (N)	1,68	24,76
		1,88	72,72
		2,00	13,99
		2,06	12,48
		2,16	12,18
		2,36	14,83
		2,52	22,81
		3,53	32,93
		3,68	52,74
		4,51	53,08
		5,30	70,70
		5,53	62,16
		5,56	33,64
		6,32	59,80
		7,30	30,27
		8,31	12,82
		10,83	47,49
5	Potássio (K)	1,16	16,24
		1,61	12,04
		1,62	15,85
		2,07	20,88
		3,55	10,12
		5,38	17,29
		5,69	12,08
		5,75	11,66

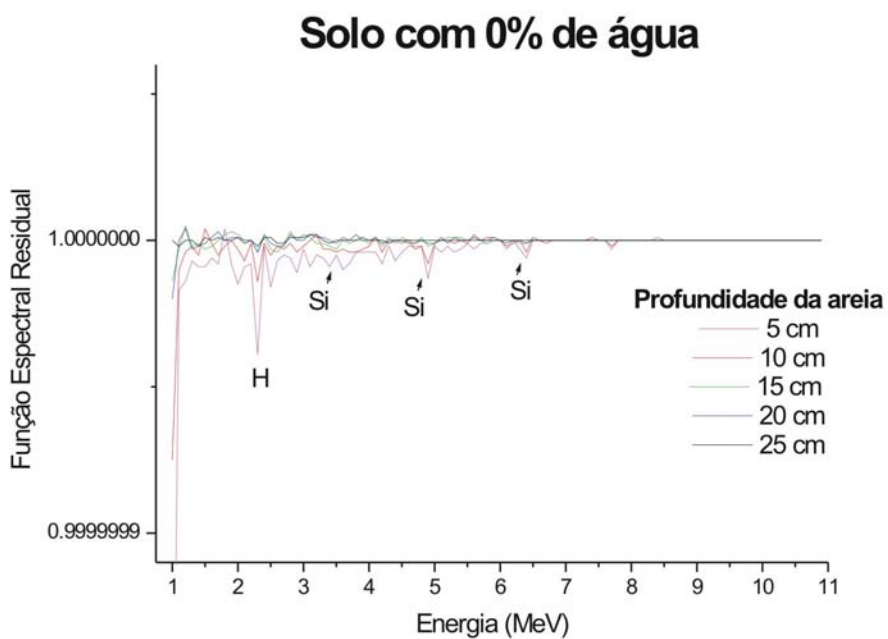
	Elemento	Energia (MeV)	Probabilidade de interação (%)
6	Silício (Si)	1,27	23,43
		2,09	31,65
		3,54	100,00
		4,93	92,19
		6,38	18,19
		7,20	11,43
7	Sódio (Na)	1,63	12,45
		2,03	28,58
		2,52	24,70
		2,86	16,96
		3,10	13,96
		3,59	24,99
		3,98	31,14
		6,39	37,07
8	Alumínio (Al)	1,62	12,21
		2,24	11,08
		2,28	10,68
		2,82	10,72
		2,96	29,13
		3,03	25,56
		3,46	22,46
		3,59	14,98
		4,13	23,41
		4,26	21,87
		4,69	14,36
		4,73	18,23
		7,69	15,13
		7,72	100,00
9	Calcio (Ca)	1,94	100,00
		2,00	13,74
		2,01	10,31
		4,42	20,59
		6,42	53,60
10	Ferro (Fe)	1,61	18,55
		1,73	21,72
		4,22	23,34
		5,92	33,10
		6,02	34,14
		7,28	20,69
		7,63	100,00

APÊNDICE C

As figuras C1 a C18 apresentam os gráficos da interação dos nêutrons térmicos com os demais materiais trabalhados nesta Tese, bem como a aplicação da função espectral residual a cada um deles.



(a)



(b)

Figura C1 – (a) Espectros de raios γ provenientes da areia enterrada no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

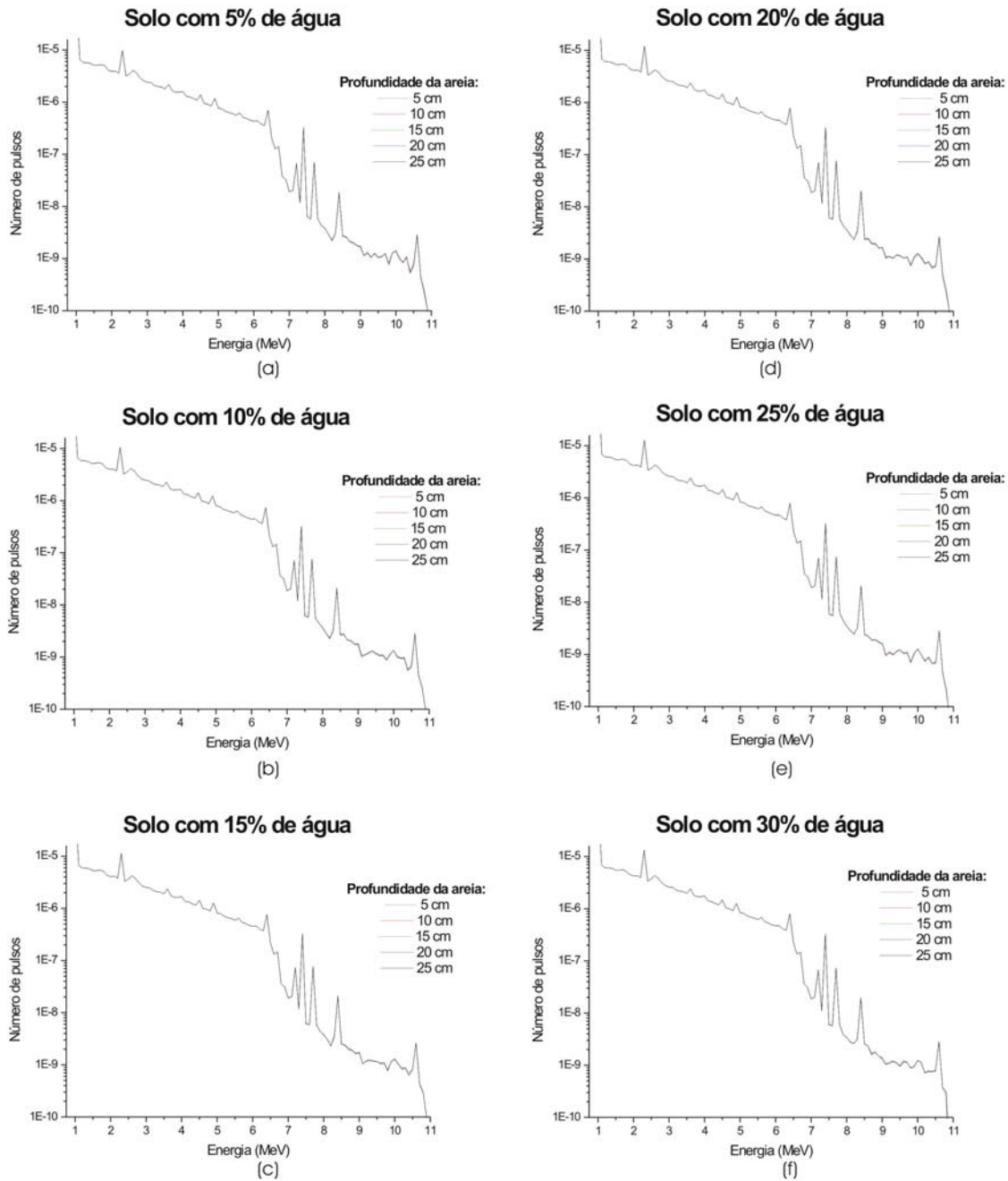


Figura C2 - Espectros de raios γ provenientes da areia enterrada no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

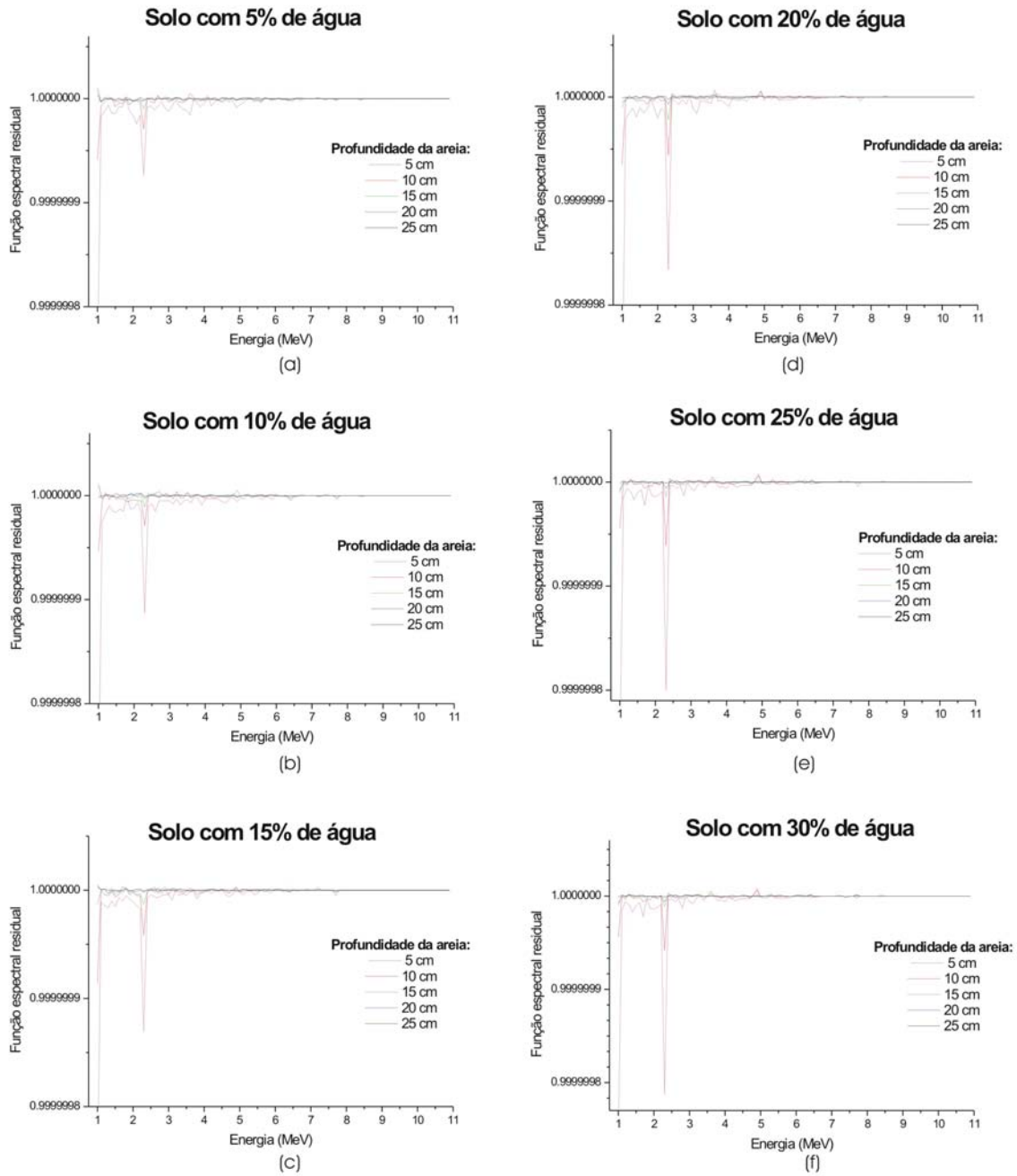
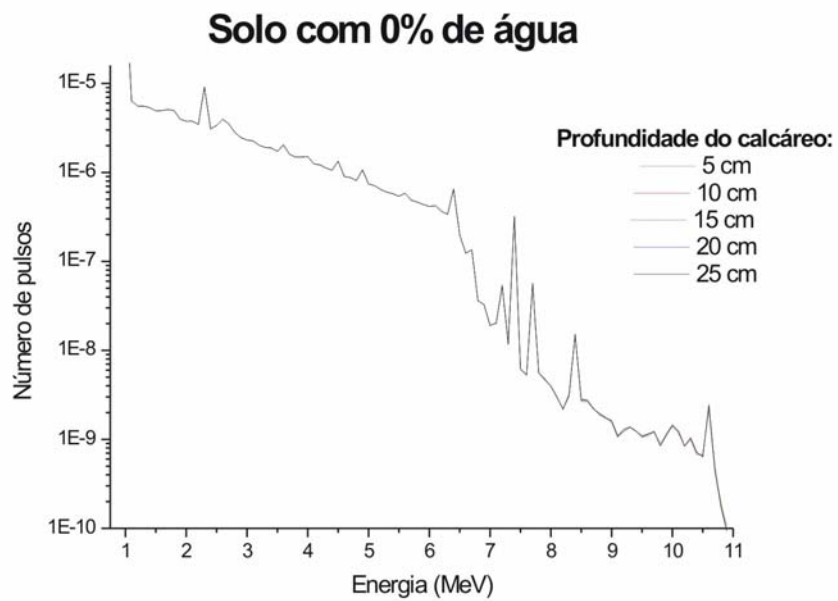
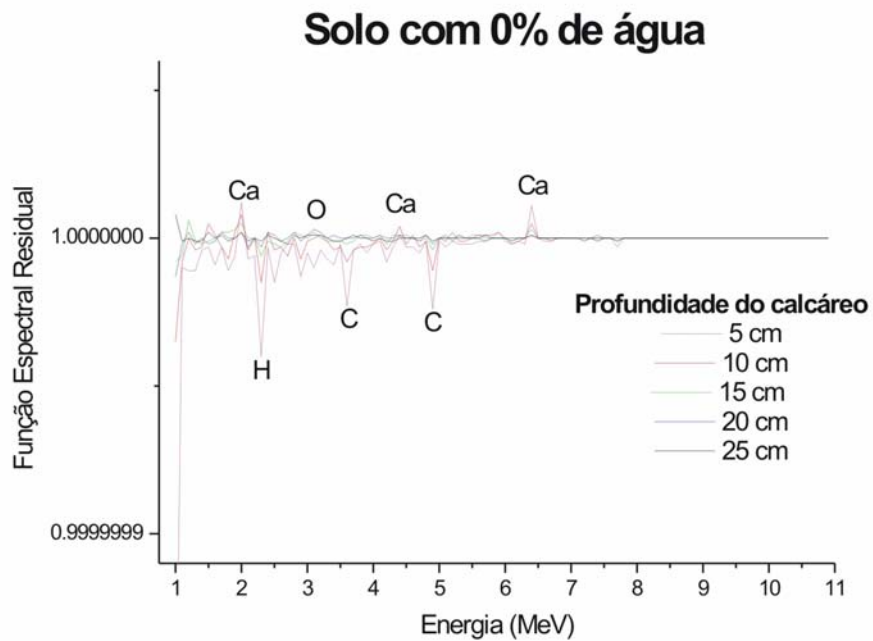


Figura C3 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C2, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.



(a)



(b)

Figura C4 – (a) Espectros de raios γ provenientes do calcáreo enterrado no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

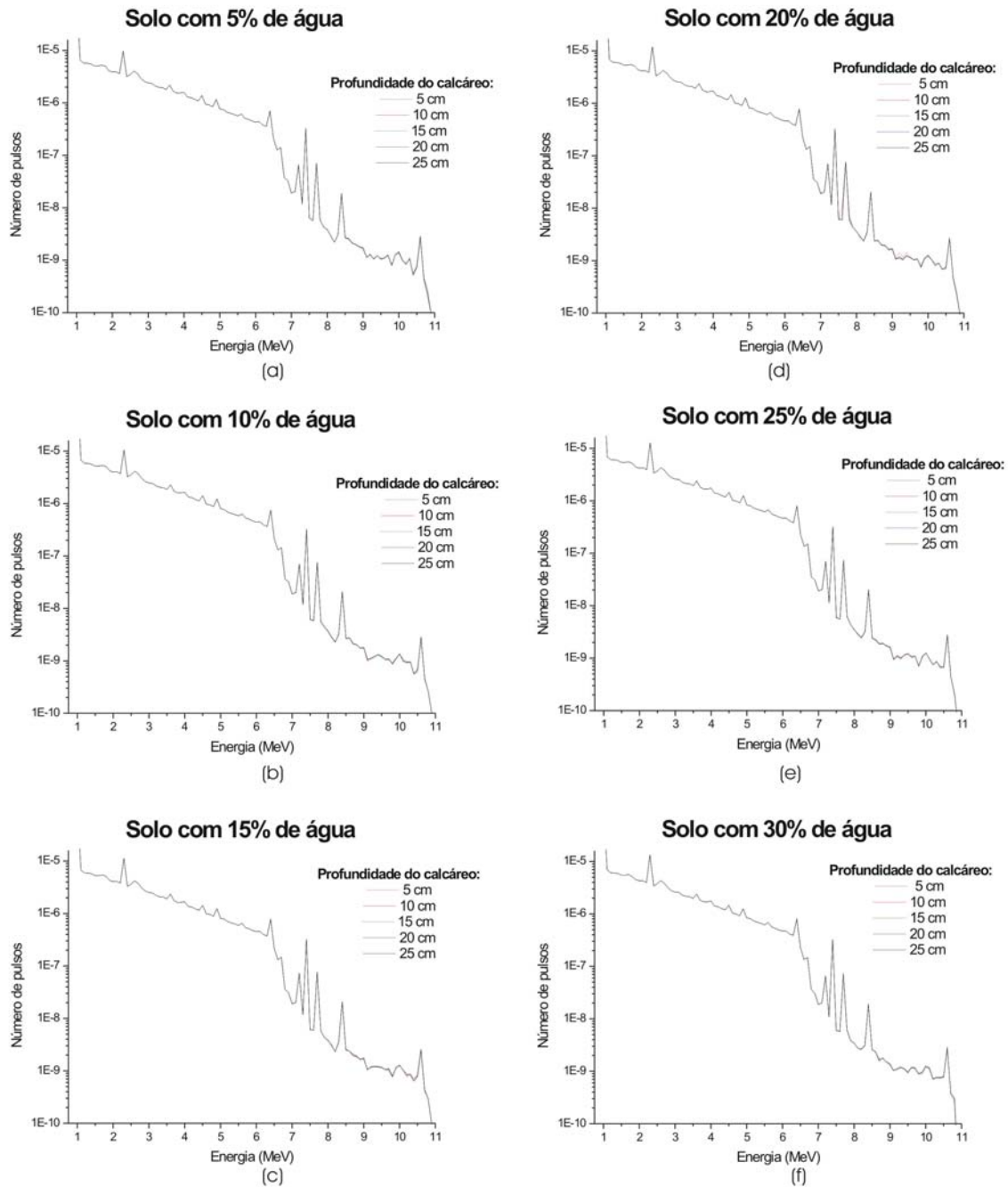


Figura C5 - Espectros de raios γ provenientes do calcáreo enterrado no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

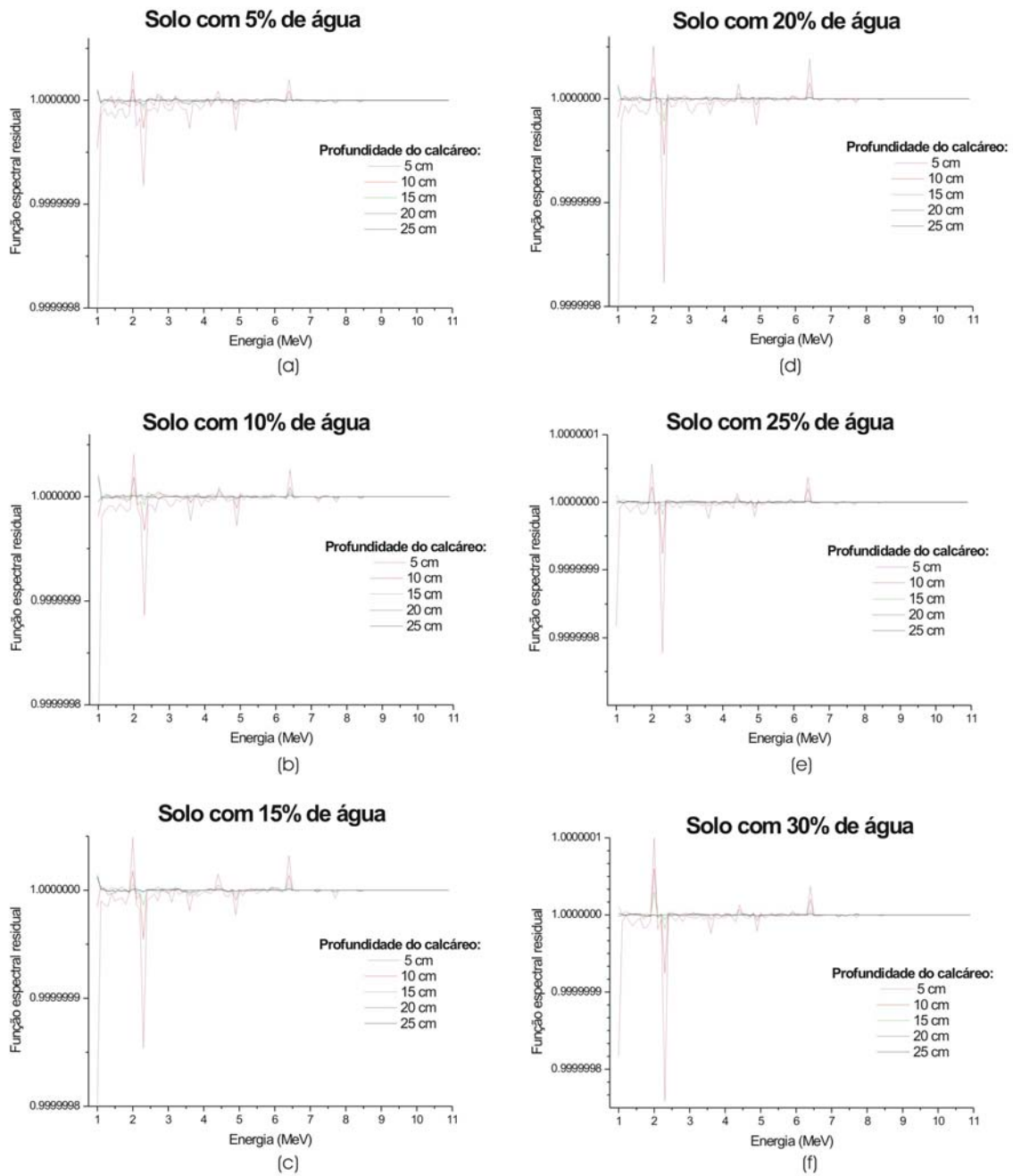
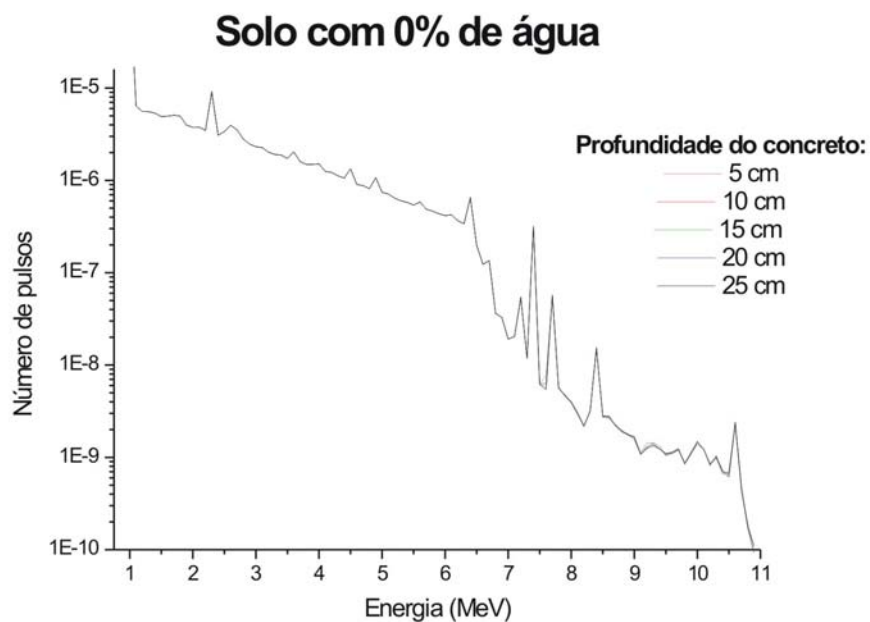
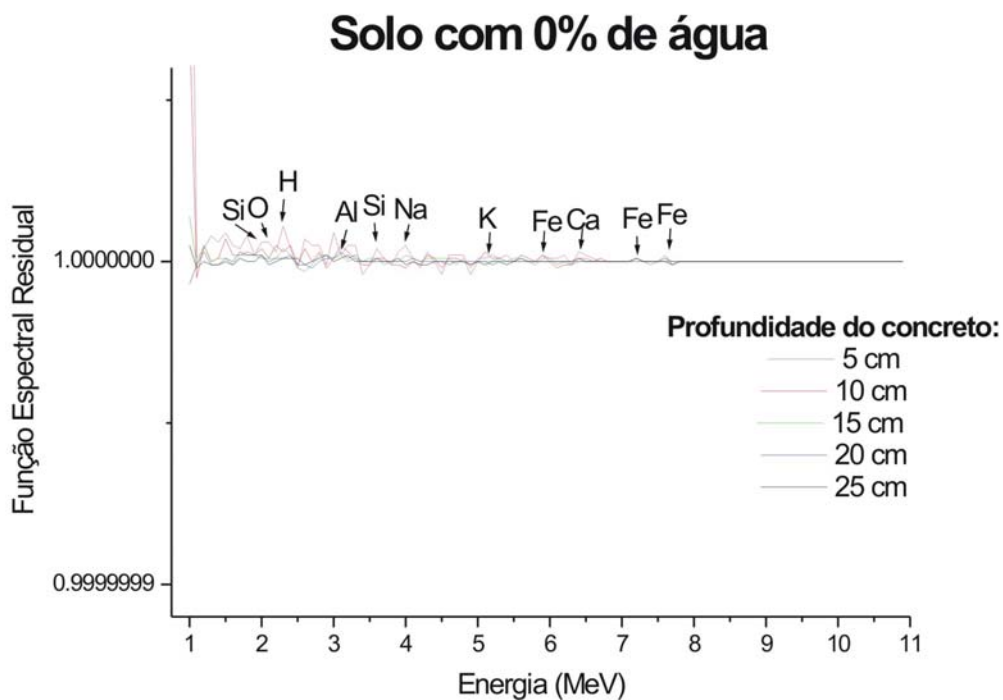


Figura C6 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C5, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.



(a)



(b)

Figura C7– (a) Espectros de raios γ provenientes do concreto enterrado no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

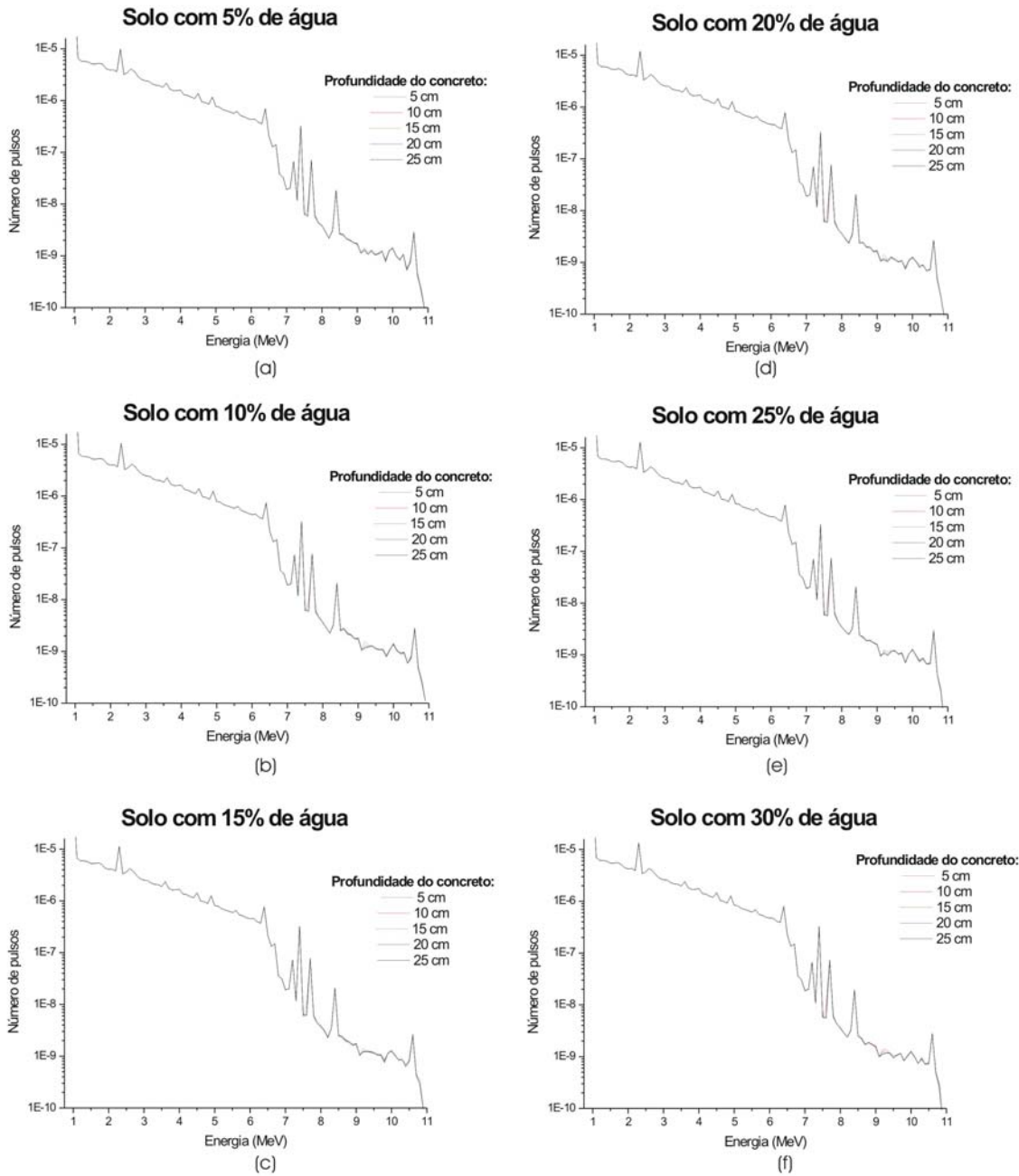


Figura C8 - Espectros de raios γ provenientes do concreto enterrado no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

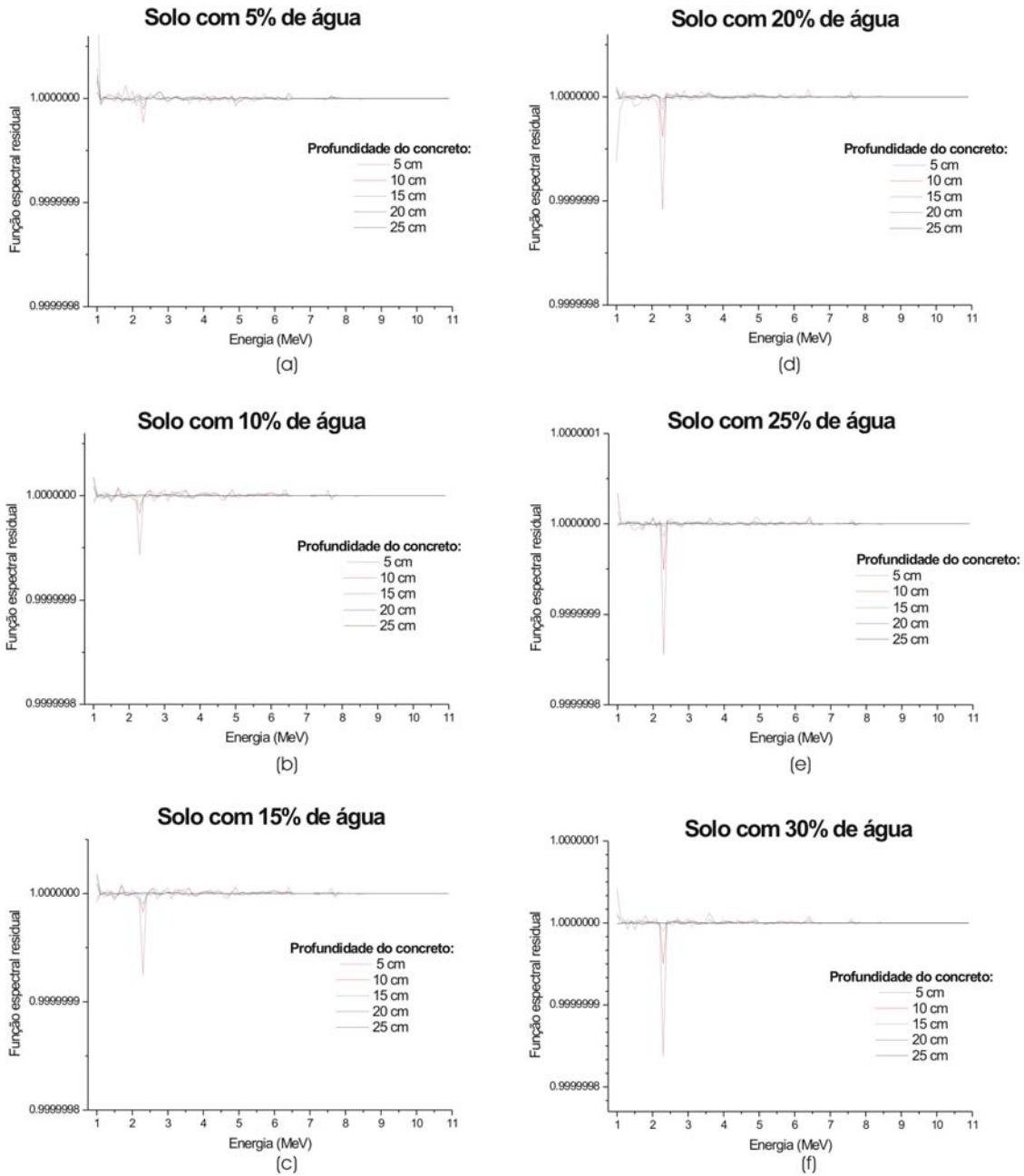
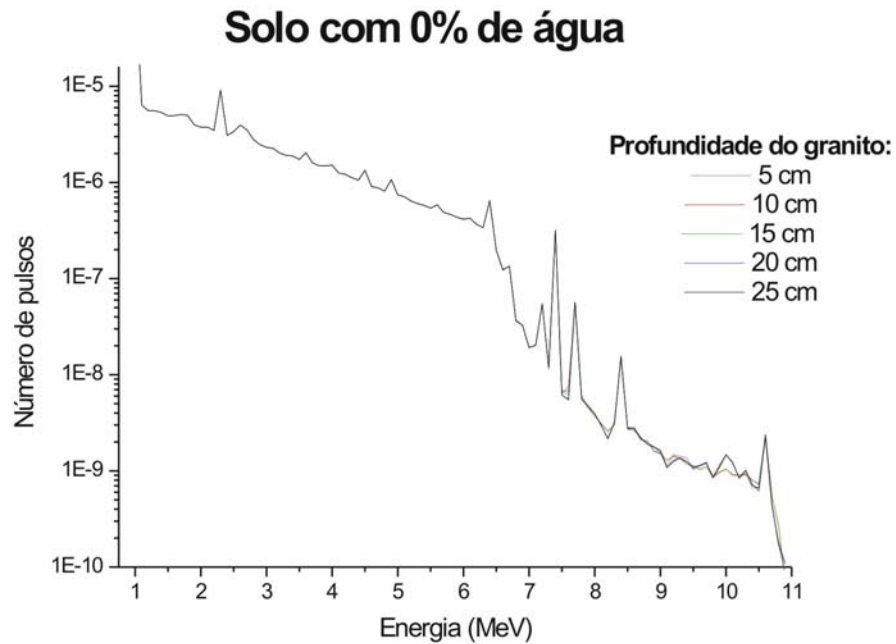
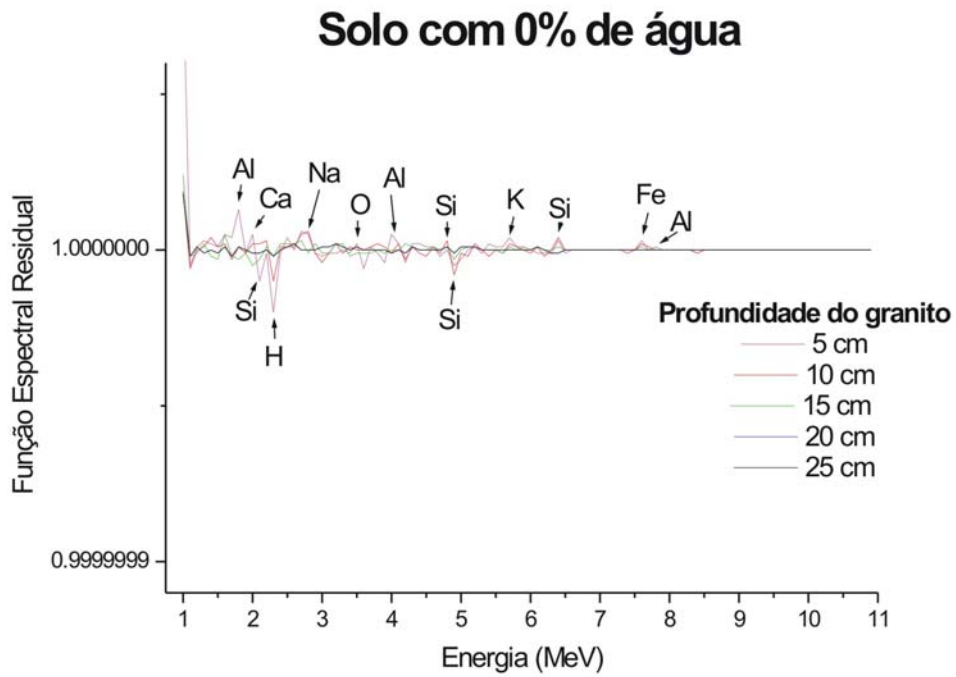


Figura C9 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C8, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.



(a)



(b)

Figura C10 – (a) Espectros de raios γ provenientes do granito enterrado no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

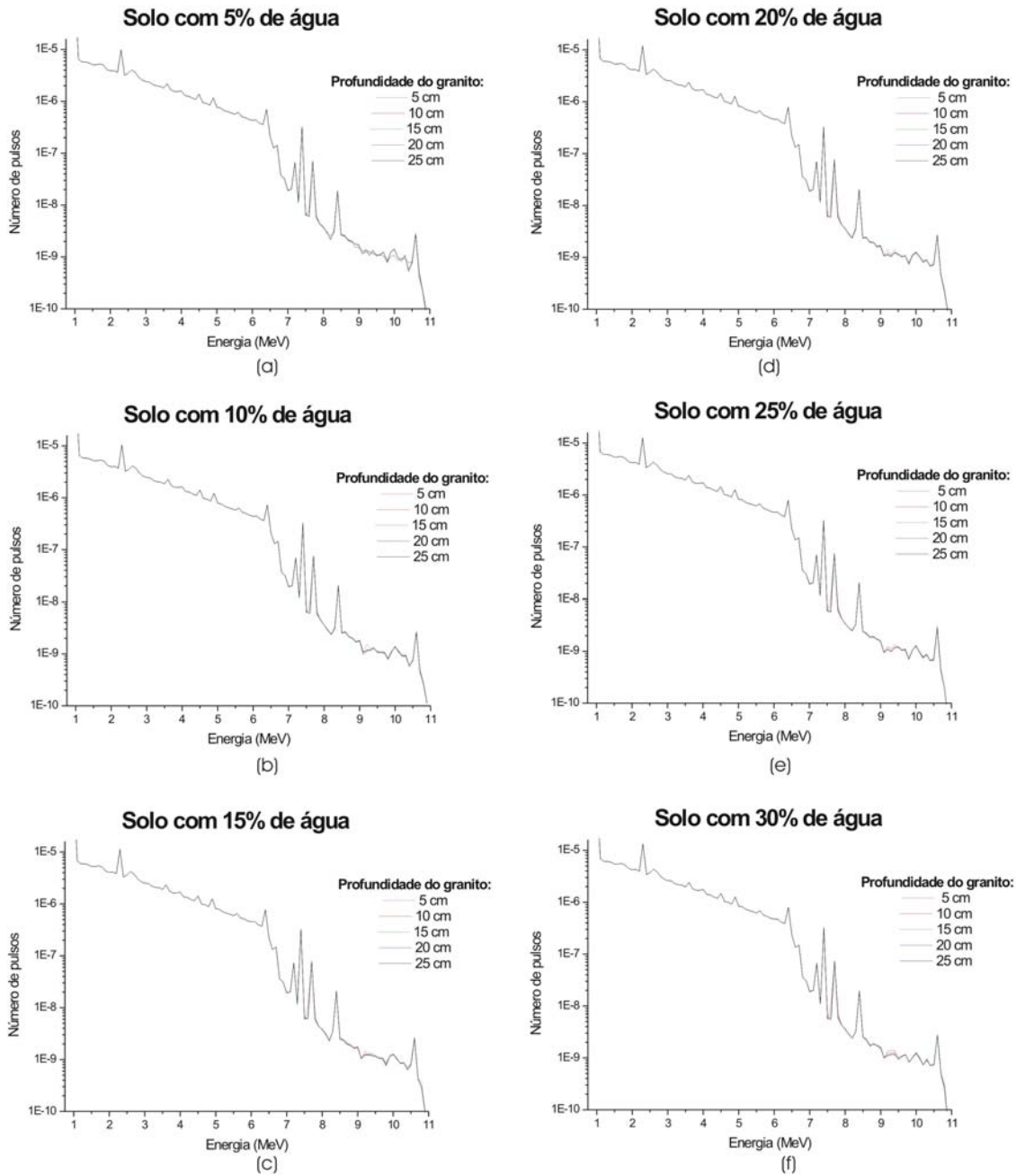


Figura C11 - Espectros de raios γ provenientes do granito enterrado no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

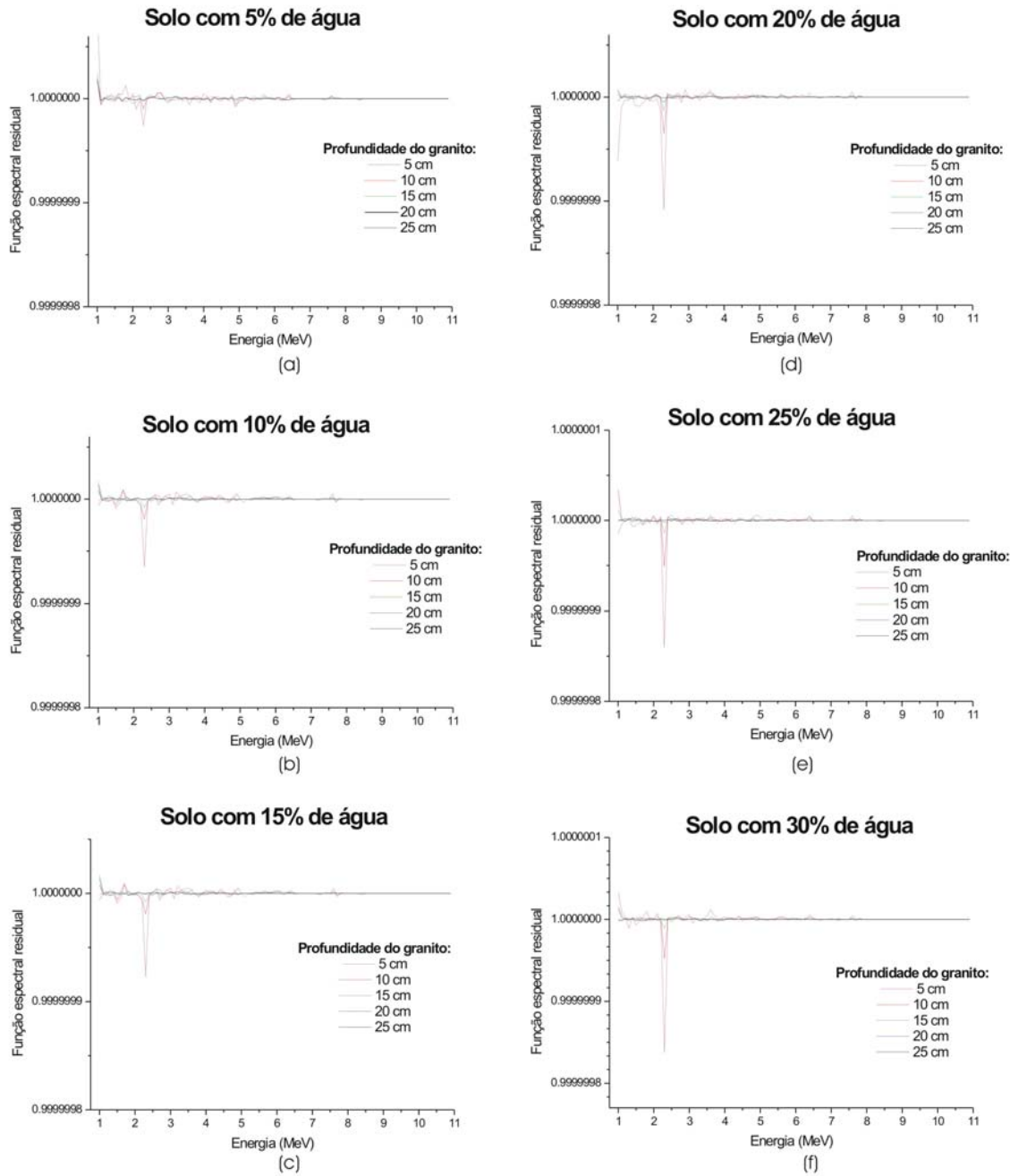
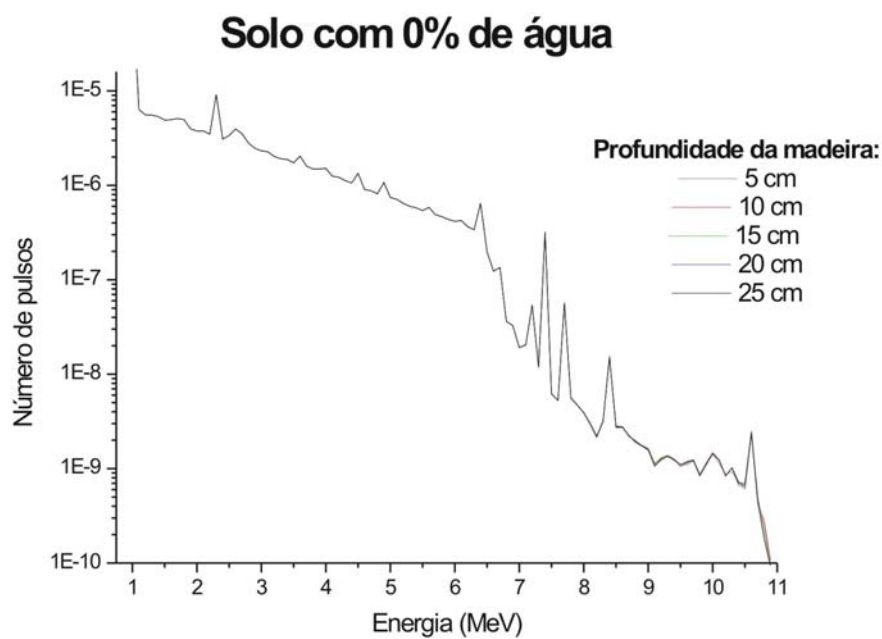
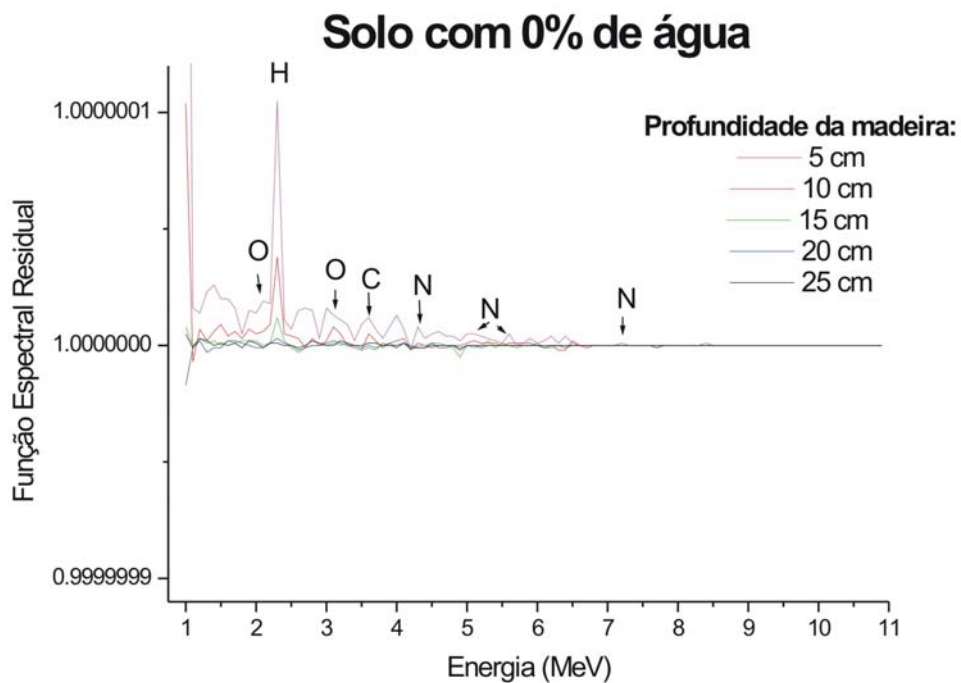


Figura C12 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C11, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.



(a)



(b)

Figura C13– (a) Espectros de raios γ provenientes da madeira enterrada no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

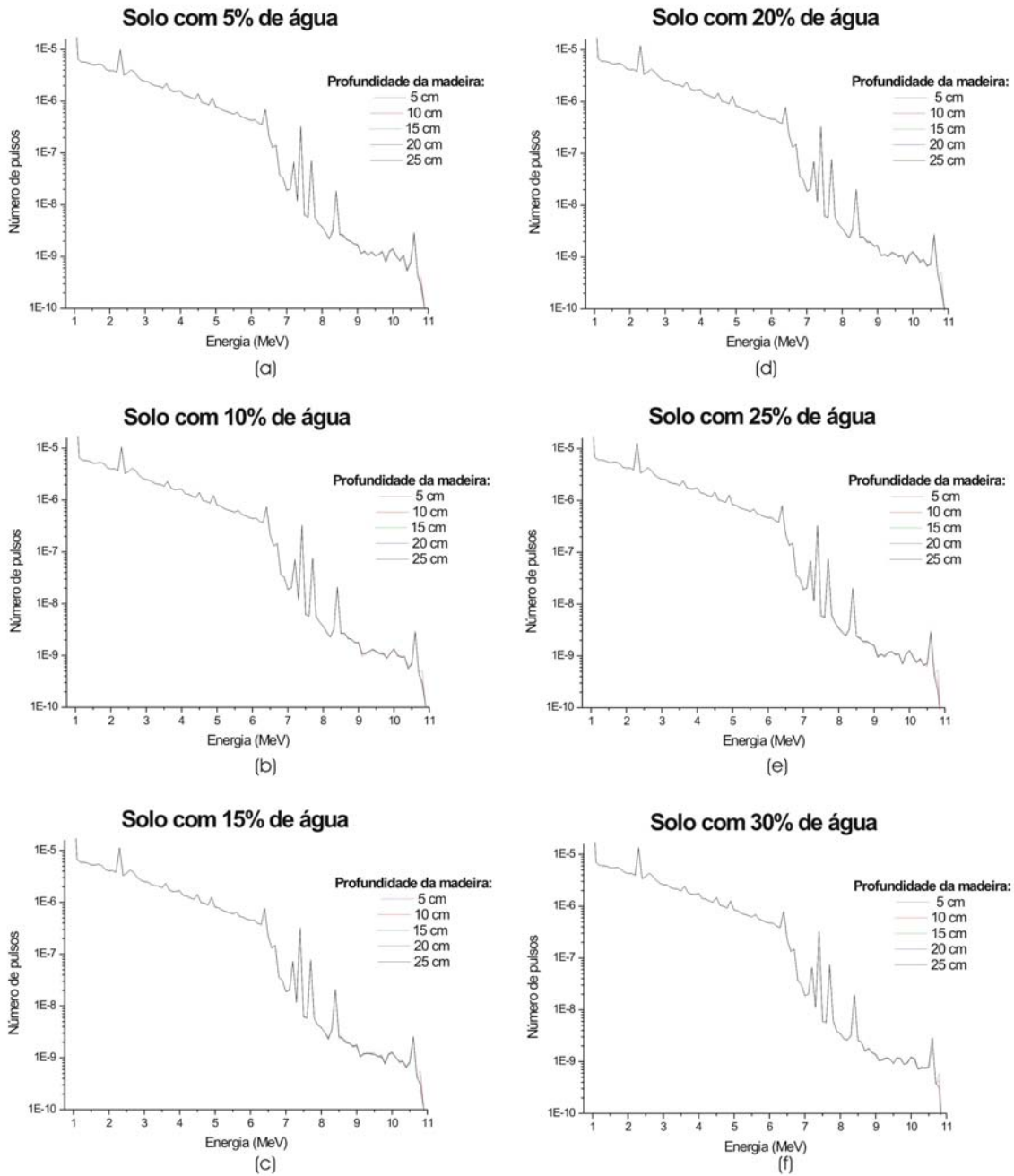


Figura C14 - Espectros de raios γ provenientes da madeira enterrada no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

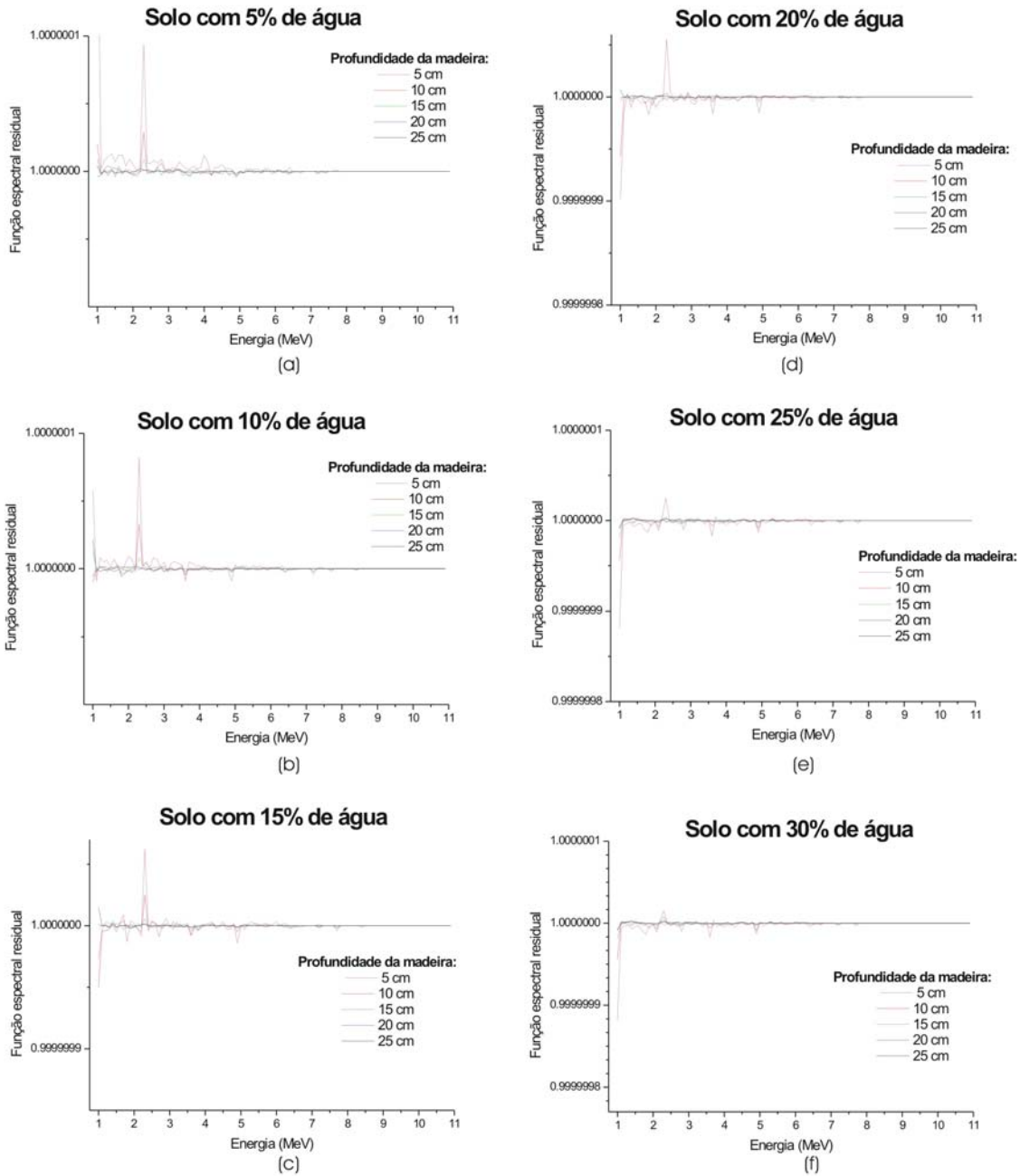
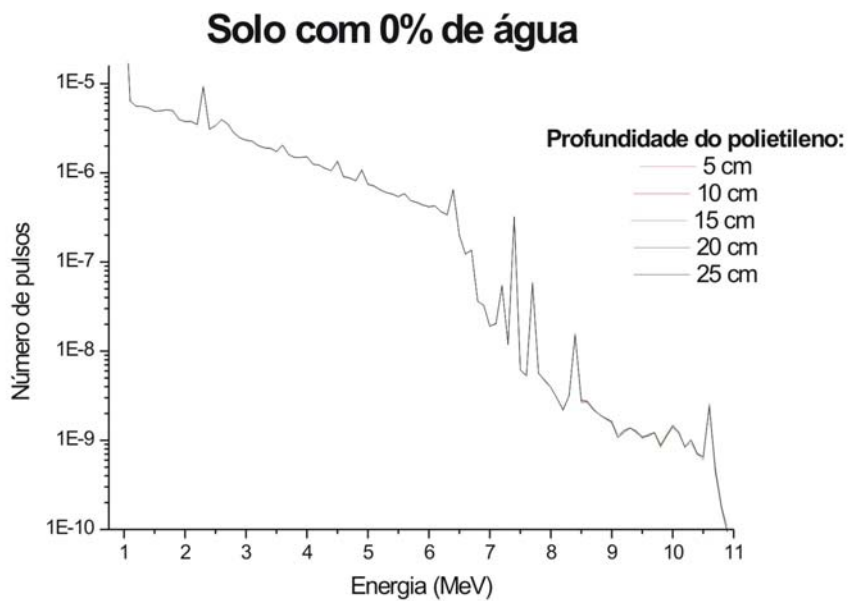
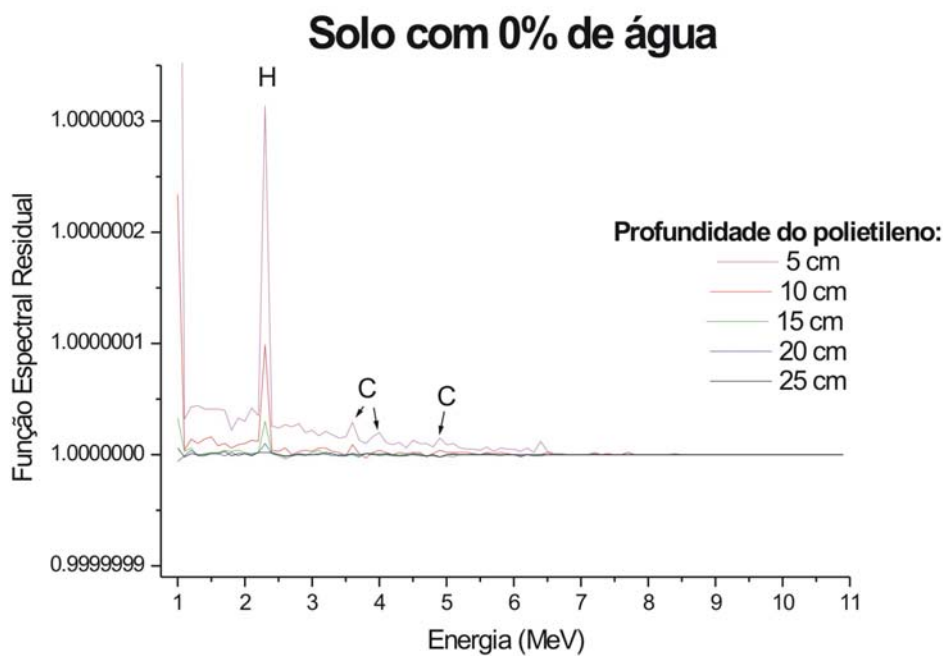


Figura C15 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C14, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.



(a)



(b)

Figura C16 – (a) Espectros de raios γ provenientes do polietileno enterrado no solo em diversas profundidades. (b) Aplicação da função espectral residual nos espectros do item (a).

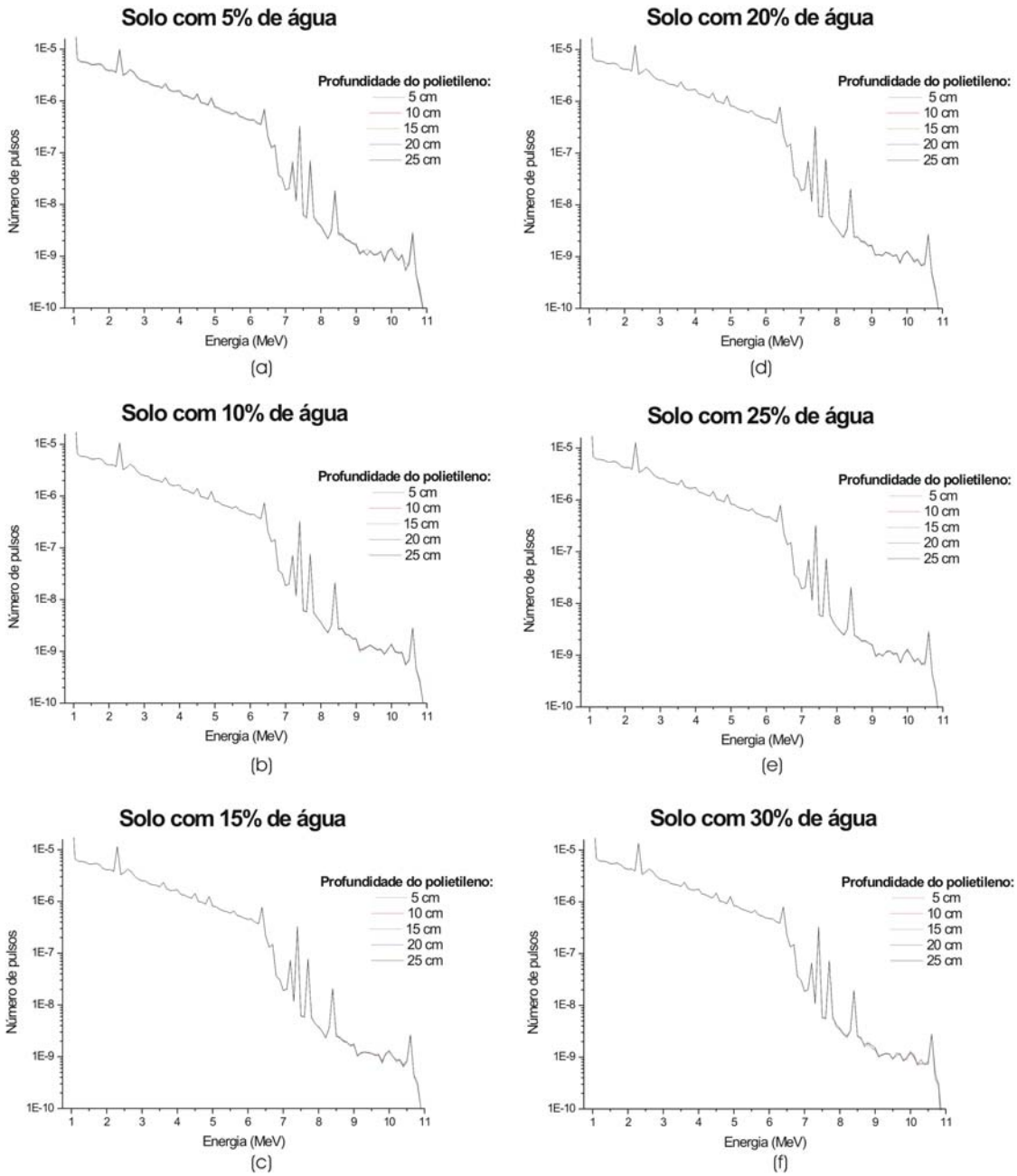


Figura C17 - Espectros de raios γ provenientes do polietileno enterrado no solo nas seguintes condições de solo com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.

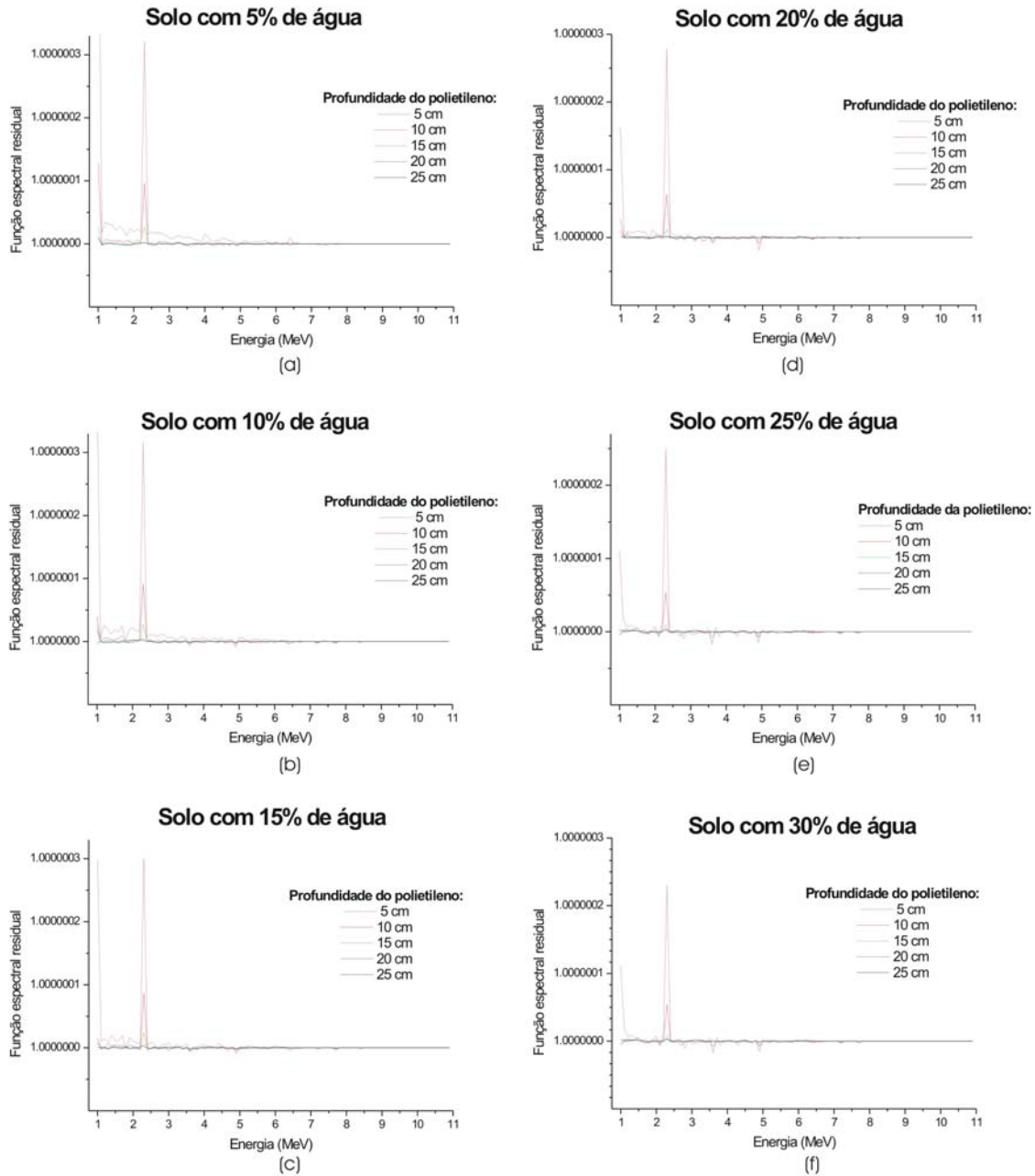


Figura C18 - Aplicação da função espectral residual nos espectros da figura C17, nas seguintes condições de solo, com: (a) 5% de água, (b) 10% de água, (c) 15% de água, (d) 20% de água, (e) 25% de água, (f) 30% de água.