

# Neutronografia Aplicada no Combate ao Narcotráfico e ao Terrorismo

Ademir X. da Silva\*, Verginia R. Crispim\*\* e Leo R. Hacidume\*

\*PEN/COPPE/UFRJ

\*\*[PEN/COPPE - DNC/EE]CTfUFRJ

Caixa Postal 68 509, 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil

Received February 8, 1999

Dentre os diversos métodos de ensaios não-destrutivos, que podem ser empregados para a detecção de narcóticos e explosivos, aqueles que empregam técnicas nucleares têm demonstrado possuir qualidades essenciais a um sistema de detecção eficiente, por permitirem inspecionar grande quantidade de amostras com rapidez, sensibilidade, especificidade e decisão automatizada, já que utilizam radiações de grande poder de penetração. Este trabalho visa mostrar a potencialidade da Neutronografia aliada à tomografia computadorizada, usando feixes de nêutrons térmicos para a detecção de drogas e explosivos mesmo quando ocultos por materiais pesados. Nos ensaios radiográficos, foram inspecionadas amostras de cocaína em pó e explosivo, ocultas por diversos materiais. As amostras foram irradiadas durante 30 minutos no canal de irradiação J-9 do reator de pesquisa Argonauta do IEN/CNEN, num fluxo de nêutrons de  $2,5 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s. Foram utilizadas duas folhas conversoras de gadolínio com espessura de 25  $\mu$ m cada e uma chapa de filme Kodak Industrex A5. São apresentadas e analisadas imagens tomográficas das amostras ocultas obtidas a partir de dados de projeções experimentais e simulados para nêutrons térmicos, raios-X de 135 keV e nêutrons de 2 MeV. A tomografia com nêutrons térmicos demonstrou ser superior às demais.

Palavras-Chave: neutronografia, tomografia, narcóticos, explosivos, Monte Carlo

Among the several methods of non-destructive essays that may be used for the detection of both drugs and explosives, the ones that utilize nuclear techniques have demonstrated to possess essential qualities for an efficient detection system. These techniques allow the inspection of a large quantity of samples fast, sensibly, specifically and with automatic decision, for they utilize radiation of great power of penetration. This work aims to show the neutron radiography and computed tomography potentiality for the detection of the drugs and explosives even when they are concealed by heavy materials. In the radiographic essays with thermal neutrons, samples of powder cocaine and explosives were inspected, concealed by several materials or not. The samples were irradiated during 30 minutes in the J-9 channel of the Argonauta research reactor of the IEN/CNEN in a neutron flux of  $2.5 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s. We used two sheets of gadolinium converter with a thickness of 25  $\mu$ m each one and a Kodak Industrex A5 photographic plaque. A comparative analysis among the tomographic images experimental and simulated obtained by X-ray, fast and thermal neutron is presented. The thermal neutron tomography demonstrate to be the best.

## 1 Introdução

O tráfico de drogas e o terrorismo trazem um custo extremamente alto para a sociedade. De acordo com a Administração Federal de Aviação nos Estados Unidos (FAA - Federal Aviation Administration), o custo estimado de uma explosão em uma aeronave civil durante o vôo é estimado em cerca de 1 bilhão de dólares, incluindo o preço do litígio de vidas humanas e material [1]. A estimativa, no entanto, não inclui o impacto psicológico e social sobre a sociedade. O custo social anual devido ao narcotráfico, de acordo com a

Agência Nacional de Polícia para o Controle de Drogas nos Estados Unidos (ONDCP - Office of National Drug Control Policy), é estimado em cerca de 67 bilhões de dólares, principalmente devido a crimes relacionados com drogas [1]. Esse custo não inclui os 49 bilhões de dólares movimentados anualmente pelos americanos para a compra de drogas ilegais. Além disso, as agências federais norte-americanas para controle de drogas investiram cerca de 15 bilhões de dólares, durante o ano fiscal de 1997, em atividades relacionadas ao controle de drogas, incluindo programas internacionais, pesquisa

e desenvolvimento científico, etc. [1]. O consumo e o tráfico de drogas vem crescendo de ano a ano no Brasil, e atinge principalmente adolescentes e jovens. O uso e o tráfico de narcóticos está também em franco aumento em todo mundo, o que é pior, cada vez atinge mais os jovens. O narcotráfico forma um império que movimenta, segundo o secretário nacional Antidrogas, Walter Maiorovitch, entre 3% e 5% do Produto Interno Bruto (PIB) do planeta. As máfias do narcotráfico formam “Estados dentro de Estados” com suas próprias leis e exército. A preocupação do governo dos Estados Unidos é séria o suficiente para justificar um investimento de 16 bilhões de dólares no orçamento de 98 para ações de combate às drogas. Já o governo brasileiro criou, recentemente, um grupo especial de cerca de 500 pessoas treinadas e capacitadas da Polícia Federal, do Exército, da Marinha, da Aeronáutica, da Receita Federal, de Governos estaduais, do Judiciário e do Ministério Público para combater as quadrilhas de narcotraficantes.

Assim, são essenciais medidas coordenadas de prevenção no que se refere à vigilância nos aeroportos, portos e principais rotas rodoviárias do país, incluindo, em particular, sistemas mais eficazes de detecção de explosivos, de narcóticos e de substâncias perigosas (tais como armas, material radioativo), escondidos na bagagem de mão, na bagagem de passageiros, e na carga em geral de um contêiner.

Várias técnicas de Ensaios Não-Destrutivos (END) são atualmente empregadas para a detecção de narcóticos e explosivos. Cada uma tem suas vantagens e limitações e outras ainda empregam equipamentos não disponíveis comercialmente. Essas técnicas utilizam as mais avançadas tecnologias em equipamentos de raios-X, detectores químicos de pequena quantidade de vapor e os métodos nucleares, tais como: sistema de análise por ativação com nêutrons e de ressonância magnética nuclear, aliados a poderosos hardware e software de reconhecimento de padrões e imagens. As descrições das técnicas podem ser obtidas, de forma sucinta, nos trabalhos de FAINBERG [2], GAO/NSIAD [1], HUSSEIN et al. [3].

As técnicas nucleares têm demonstrado possuir qualidades essenciais a um sistema de detecção de narcóticos e explosivos, por permitirem inspecionar grande quantidade de amostras com relativa rapidez, sensibilidade, especificidade e decisão automatizada, já que utilizam radiações de grande poder de penetração. Essas qualidades são importantes para um efetivo sistema de detecção de narcóticos, explosivos e armas, bem como para o desenvolvimento de um sistema industrial *on line* para o controle de qualidade.

O presente trabalho visa demonstrar a potencialidade da neutronografia (radiografia com nêutrons) ali-

ada à tomografia computadorizada por transmissão, utilizando um feixe de nêutrons térmicos para a detecção de narcóticos e explosivos ocultos por diversos materiais, para fins de Segurança Pública Nacional.

A realização de uma tomografia por transmissão com neutronografias, utiliza um feixe colimado de nêutrons térmicos e filme radiográfico convencional e requer o desenvolvimento de três etapas: a) obtenção de um conjunto limitado de neutronografias da amostra, que são registradas em orientações angulares diversas, relativamente ao seu centro rotacional e coincidente com o da mesa tomográfica; b) digitalização dessas neutronografias, na linha correspondente à seção transversal em exame da amostra, por um digitalizador adequado; c) reconstrução da imagem bidimensional da amostra, relativa ao plano específico inspecionado, executada por um algoritmo de reconstrução, utilizando como dados de projeção aqueles gerados na etapa b.

## 2 Metodologia

O tráfico de drogas tem sido realizado com grande engenhosidade e, ultimamente, os noticiários divulgam a perspicácia dos traficantes na embalagem da droga, envolta até em fumo, deliberadamente, para confundir o olfato dos cães farejadores. Analisamos a imagem neutronográfica e tomográfica de uma certa quantidade (50 mg) de cocaína em pó com grau de pureza de 90% e de explosivo plástico acondicionadas em tubos de alumínio, submetidos a ocultação por chumbo e tecido de algodão em espessuras compatíveis. A ocultação por chumbo foi usada para demonstrar que a neutronografia é uma técnica alternativa, em relação a uma inspeção por radiografia-X, impotente, nesse caso. O tecido de algodão é um material muito comum em malas de passageiros em trânsito em terminais aeroviários, rodoviários, ferroviários, etc.

As amostras foram neutronografadas no canal de irradiação J-9, localizado na coluna térmica do reator Argonauta do IEN/CNEN, sob as seguintes condições no plano de detecção da imagem: razão L/D de 70, razão de cádmio de 20, razão nêutron/gama de  $3 \times 10^6$  n/cm<sup>-2</sup>.mR<sup>-1</sup>, uma fluência neutrônica total de  $2,1 \times 10^9$  n/cm<sup>2</sup>. O método de exposição direta foi usado, com duas folhas conversoras de gadolínio com 25  $\mu$ m de espessura cada em contacto íntimo com o filme radiográfico da Kodak, do tipo A-5 Industrex, posicionado frontalmente em relação ao feixe. Cada neutronografia foi obtida após exposição ao feixe neutrônico por 30 minutos, determinado pela curva característica do sistema detector (filme radiográfico/conversor) com o reator operando a 170 W de potência. As amostras de

cocaína e explosivo foram acondicionadas em tubos fechados de alumínio, com paredes de 2 mm de espessura, 10 mm de diâmetro e 50 mm de altura.

Na borda do canal foi fixada uma mesa tomográfica automatizada, que permite obter diversas projeções neutrongráficas, angularmente espaçadas desde 0° a 180°. Cada tomografia foi obtida por um conjunto de seis projeções neutrongráficas da amostra, em orientações angulares diferentes correspondentes a intervalos subsequentes de 30°.

Para se utilizar corretamente as projeções no Algoritmo de Reconstrução de Imagens usando o critério de Entropia Máxima, AREM [4], o ajuste do centro das medidas ficou definido pela superposição da imagem de dois ponteiros de gadolínio, fixados num disco móvel, onde se coloca cada amostra, nas posições angulares de 0° e 180°. Dois ponteiros de cádmio foram marcados na mesa, calibrados em relação às extremidades do disco móvel, diametralmente distanciados, na direção horizontal. Paralelamente ao eixo de rotação, fixou-se uma régua de alumínio coberta de cádmio, possuindo diversos furos de 1,0 mm de diâmetro, que servem para a escolha do plano de reconstrução escolhido em cada neutrongrafia, conforme está mostrada na figura 1.

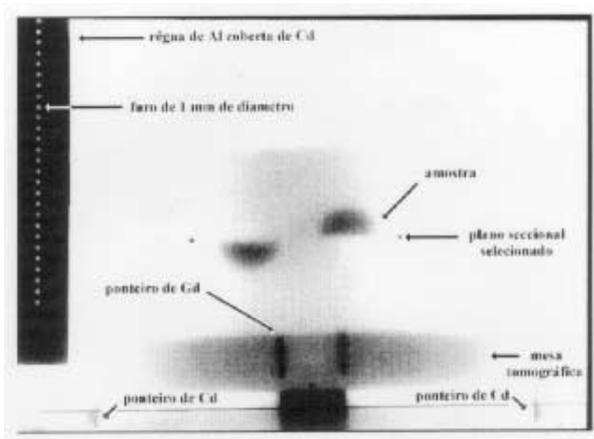


Figura 1. Configuração da mesa tomográfica instalada no canal J-9 do reator Argonauta/IEN/CNEN.

Os filmes radiográficos foram processados de acordo com as recomendações do fabricante Kodak: imersão no revelador a 20°C por 5 minutos e, no fixador por 8 minutos. As neutrongrafias (negativos) foram esquadrinhadas, com base nas imagens dos marcadores alinhados e fixados na mesa tomográfica, e depois reproduzidas em filme positivo Kodak. Cada uma das reproduções foi digitalizada por um scanner ARTEC VEW STATION AT3, com resolução de *pixel* de 500µm x 500µm.

Os procedimentos experimentais foram simulados

numericamente, visando a obtenção de dados relativos às seis projeções angulares. O código Monte Carlo de transporte de partículas, MCNP (*Monte Carlo N-Particles*), versão 4B[5], foi usado para modelar o canal de irradiação, o espectro de energia dos nêutrons emergentes do canal, as amostras (inclusive ocultas) e o meio conversor (folha metálica de gadolínio), que foi segmentado em 103 partes quadradas com áreas de 500µm x 500µm (células).

### 3 Resultados e conclusões

Analisamos os resultados através das próprias imagens, qualitativamente e quantitativamente, avaliando os parâmetros de distorção,  $\delta$ , entre as imagens simuladas e reconstruídas do objeto pela seguinte relação [6]:

$$\delta = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I'_{ij})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{ij} + I'_{ij})^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

e pelo parâmetro de flutuação,  $\xi$ , apresentada pela própria imagem baseada sobre os oito-vizinhos mais próximos. Este parâmetro é estimado pela relação:

$$\xi = \frac{1}{8N^2} \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{N-1} \left| 9I'_{ij} - \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} I'_{km} \right| \quad (2)$$

onde  $i, j$  são as coordenadas das células,  $N$  é a dimensão das imagens,  $I_{ij}$  é a imagem simulada da amostra e  $I'_{ij}$ , sua imagem reconstruída a partir de dados experimentais.

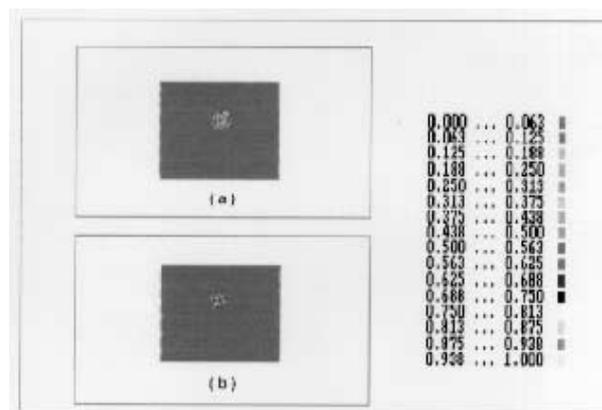


Figura 2. Tomografias da amostra cilíndrica de explosivo ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) obtidas a partir de dados: (a) experimentais (*scanner*) e (b) simulados (sistema real).

Nas figuras 2(a) e (b), são mostradas as tomografias obtidas a partir de dados experimentais e simulados, relativas a um tubo de alumínio com 30 mm de diâmetro, 50 mm de altura e 2 mm de espessura de

parede, envolvendo outro tubo cilíndrico com 10 mm de diâmetro, 30 mm de altura e 1 mm de espessura de parede, contendo nitrato de amônia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), cuja composição simula o comportamento de um explosivo plástico. Para se obter a imagem apresentada em (a), os negativos dos filmes radiográficos, foram copiados em papel fotográfico e uma linha de interesse de cada imagem foi digitalizada pelo *scanner*, correspondente ao plano de reconstrução escolhido sobre a régua fixa à mesa tomográfica. A distorção entre as imagens obtidas usando o *scanner* e a simulada foi de  $9 \times 10^{-5}$  e as flutuações de 0,4 e 0,6 para a imagem simulada e experimental, respectivamente. Os dados concernentes às seis projeções neutrongráficas geradas pelo MCNP4B e os obtidos após a digitalização das imagens positivas, pelo *scanner* podem ser vistos nas figuras 3 e 4, respectivamente.

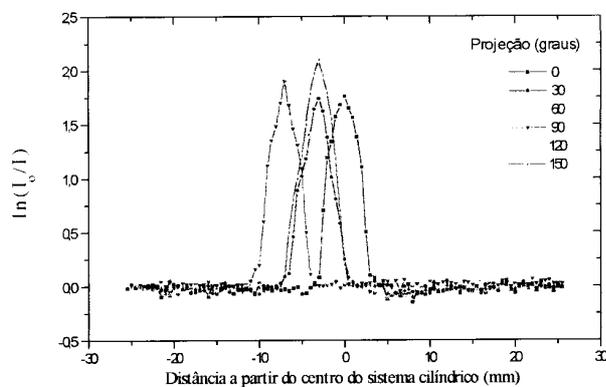


Figura 3. Projeções geradas pelo MCNP relativas ao cilindro de explosivo, descentralizado, no interior de um tubo de alumínio.

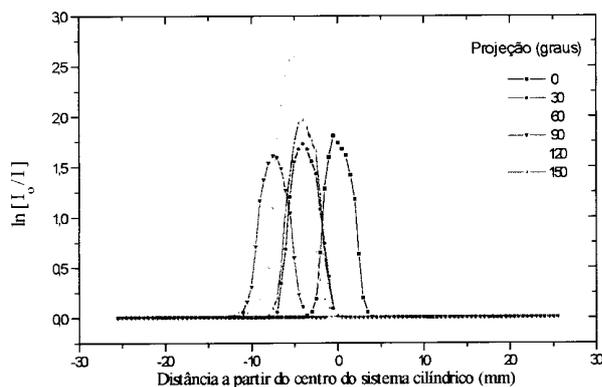


Figura 4. Projeções obtidas após digitalização das imagens positivas pelo *scanner*, nas condições da figura 3.

O mesmo procedimento foi adotado, ao se, substituir o tubo de alumínio por outro de chumbo de mesma altura e diâmetro, mas com 5 mm de espessura de parede. Os resultados das tomografias, obtidas a partir de dados experimentais digitalizados pelo *scanner* e por simulação, estão mostrados nas figuras 5(a) e (b),

respectivamente. A detecção do explosivo foi possível mesmo quando oculto pelo chumbo. A explicação está no fato de que o feixe de nêutrons térmicos sofre uma atenuação maior na amostra de explosivo do que no chumbo, isto é, o explosivo atenua fortemente o feixe de nêutron térmicos (mais pelo fenômeno de espalhamento do que de captura) que, por sua vez, atravessam mais facilmente o chumbo. A distorção entre elas foi de  $5 \times 10^{-4}$  e as flutuações de 0,6 e 0,8 para a imagem simulada e a experimental, respectivamente. As figuras 6(a) e (b) mostram as tomografias obtidas a partir de dados simulados do tubo de alumínio contendo o explosivo ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), oculto nas mesmas condições descritas acima para o chumbo (5 mm de espessura de parede), quando o feixe de nêutrons térmicos é substituído por um de raios X de 200 keV (a) e por um outro de raios  $\gamma$  de 662 keV (b). Nesse caso, como já era esperado, não foi possível a detecção do explosivo, pois o chumbo possui alto coeficiente de atenuação para fótons dessas energias. Assim, materiais densos, como o chumbo, para os quais os raios-X ou gama apresentam baixo poder de penetração, podem ser inspecionados, visando a detecção de explosivos escondidos em seus interiores, usando tomografia com nêutrons térmicos. Isso demonstra que a técnica permite a detecção e análise não destrutiva não somente de explosivos, mas também de narcóticos - uma vez que esses últimos contém uma maior concentração de hidrogênio e carbono - mesmo quando ocultos por materiais de elevado número atômico.

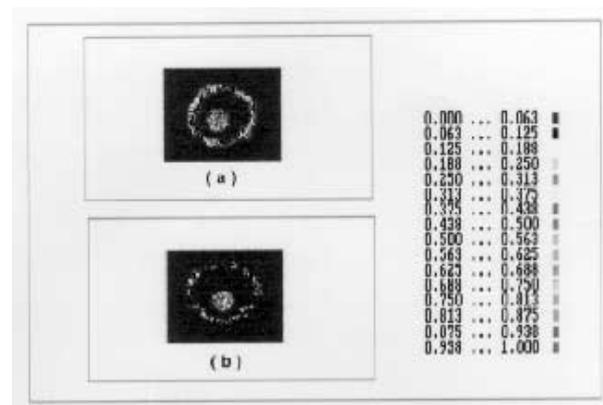


Figura 5. Reconstruções tomográficas da amostra de explosivo oculto por um tubo de chumbo com 30 mm de diâmetro e 5 mm de espessura de parede, obtidas a partir de dados experimentais digitalizados pelo *scanner* (a), e gerados pelo MCNP (b).

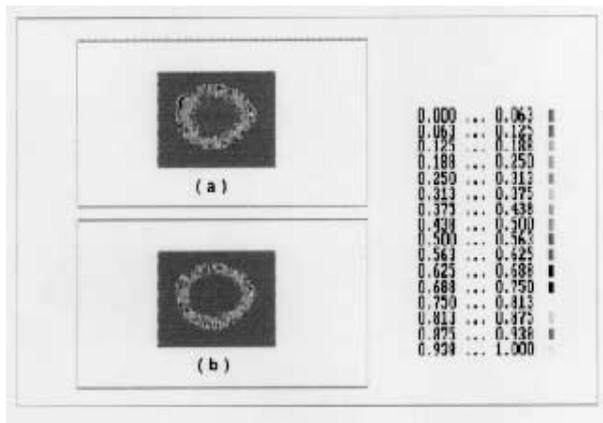


Figura 6. Tomografias com fótons de 200 keV (a) e 662 keV (b) da amostra de explosivo, nas condições da figura 5, obtidas partir de dados gerados pelo MCNP.

Na figura 7(a), é mostrada a tomografia simulada de 50 mg de cocaína em pó acondicionada em um tubo de alumínio com 1 mm de parede e 9 mm de diâmetro (amostra 1), circundada por outro de 2 mm de parede e 30 mm de diâmetro, e, na figura 7(b), a imagem tomográfica relativa aos dados experimentais obtidos por registro em filmes positivos que foram digitalizados pelo *scanner*. Visualmente, as reconstruções tomográficas da amostra podem ser consideradas de boa qualidade.

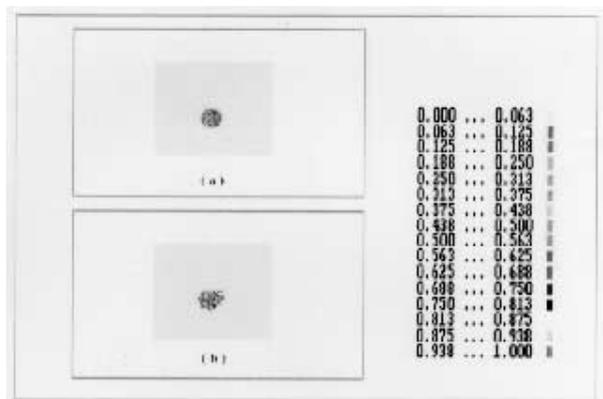


Figura 7. Tomografias da amostra de cocaína em pó obtidas a partir de dados: (a) simulados e (b) experimentais (*scanner*).

As tomografias experimentais da amostra de cocaína em pó a 90%, descentralizada, quando oculta por tecido de algodão, e circundada por um tubo de alumínio de 2 mm de parede e 30 mm de diâmetro, obtidas a partir de dados simulados e com varreduras processadas pelo *scanner* são mostradas nas figuras 8(a) e (b), respectivamente. Procedimento análogo foi seguido, ocultando a amostra do explosivo (nitrato de amônia) pelo tecido de algodão, e as reconstruções tomográficas são apresentadas nas figuras 9(a) e (b). Analisando as imagens mostradas nas figuras 8(a) e (b), observa-se que as

reconstruções tomográficas com nêutrons térmicos caracterizam bem a presença da droga, mesmo quando oculta por uma camada compatível de tecido de algodão. Nota-se que a região ocupada pela droga é melhor ressaltada que a do tecido. A tomografia computadorizada por transmissão utilizando um feixe de nêutrons térmicos mostrou-se bastante satisfatória e eficiente para detectar a presença da droga oculta por tecido de algodão. O mesmo desempenho não é observado para o simulador de explosivo, quando analisamos as figuras 9(a) e (b). O contraste entre o tecido de algodão e o explosivo é tão tênue que, visualmente, é difícil caracterizar a presença do explosivo, em decorrência do nitrato de amônia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) possuir alta concentração de nitrogênio e oxigênio e baixa concentração de hidrogênio, estando oculto pelo tecido de algodão, cuja constituição química é rica em hidrogênio.

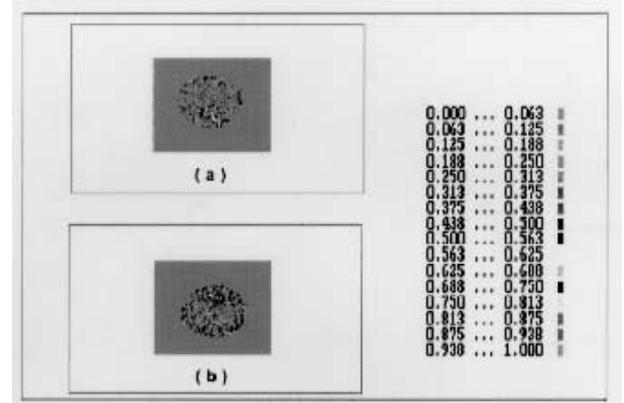


Figura 8. Tomografias da amostra de cocaína oculta por tecido e circundada por um tubo de alumínio com 30 mm de diâmetro e 2 mm de espessura de parede, obtidas a partir de dados gerados pelo MCNP (a), e experimentais digitalizados pelo *scanner* (b).

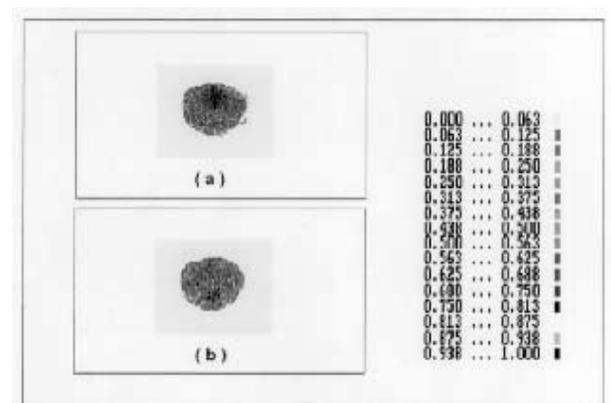


Figura 9. Tomografias da amostra de explosivo, nas condições da figura 8, obtidas partir de dados digitalizados pelo *scanner* (a), e simulada (b).

Na figura 10(a), apresenta-se a reconstrução simulada da imagem relativa a cocaína em pó a 90%, oculta

pelo tecido de algodão e paredes de alumínio dos tubos, obtida a partir de dados de projeções gerados por raios-X monoenergéticos de 135 keV, e, na figura 10(b), a imagem tomográfica relativa à amostra de nitrato de amônia oculta nas condições de (a). A energia de 135 keV situa-se na faixa de energia de operação dos aparelhos de raios-X instalados em aeroportos [1]. As reconstruções tomográficas não caracterizam a presença das amostras ocultas pelo tecido, já que os elementos constituintes dos compostos hidrogenados (tecido, cocaína e nitrato de amônia) apresentam números atômicos próximos, resultando em pouca variação dos coeficientes de atenuação, para raios-X de uma dada energia.

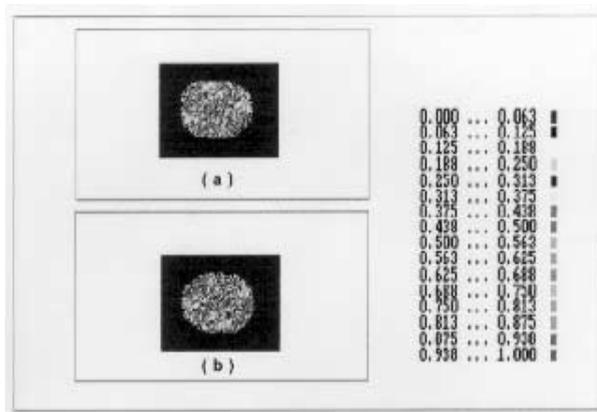


Figura 10. Tomografias com raios-X de 135 keV das amostras de cocaína (a), e de explosivo (b), ocultas por tecido, e circundada por um tubo de alumínio com 30 mm de diâmetro e 2 mm de espessura de parede, obtidas a partir de dados gerados pelo MCNP.

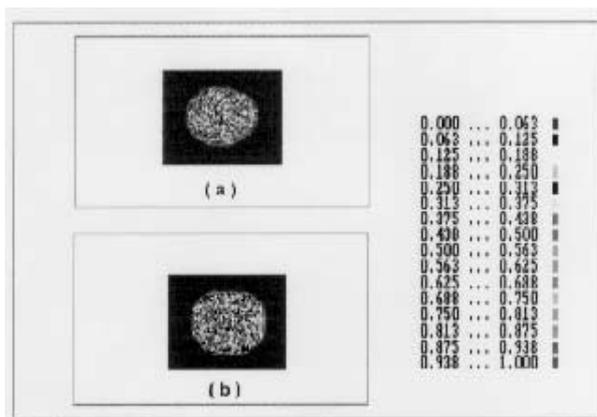


Figura 11. Reconstruções tomográficas com nêutrons de 2 MeV das amostras de cocaína (a) e de explosivo (b), nas condições da figura 10, simulada pelo MCNP.

Procedimento análogo foi adotado, para se obter a imagem tomográfica das amostras para um feixe de nêutrons rápidos monoenergéticos de 2 MeV, cujo valor é próximo ao da energia média dos nêutrons prontos emitidos pelo  $^{252}\text{Cf}$  [7] e pertence à faixa de energia dos nêutrons gerados por alguns aceleradores de partículas [8]. Nas figuras 11 (a) e (b), são apresentadas as imagens tomográficas simuladas das amostras de cocaína e explosivo ocultas por tecido de algodão, respectivamente, cuja distinção entre o tecido e as amostras de droga e explosivo também não é obtida.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN, em especial a toda equipe do SUMAR, ao Sr. Valdir Gante do Laboratório Fotográfico e a Sra. Rosilda M. G. Lima da Supervisão de Tecnologia Química. Ao Perito de Criminal Federal Sr. Alberto Tavares Neto do SECRIM/SR/DPF/RJ.

## References

- [1] GAO/NSIAD, 1997, *Terrorism and Drug Trafficking*. GAO/NSIAD/RCED-97-95, April, Washington, United States.
- [2] FAINBERG, A., "Explosives Detection for Aviation Security" *Science*, **255**, 1531 (1992).
- [3] HUSSEIN, E.M.A., WALLER, E.J., "Review of one-side approaches to radiographic imaging for detection of explosives and narcotics" *Radiation Measurements*, **29**, 581 (1998).
- [4] CRISPIM, V.R., 1993, *Desenvolvimento de Ensaios Não-Destrutivos com Neutronografias*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. RJ. Brasil.
- [5] BRISMEISTER, J. F., 1997, *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA- 12625-M, March.
- [6] HERMAN, G. T., 1980 *Image Reconstruction from Projections the Fundamentals of Computerized Tomography*. New York. Academic Press.
- [7] KNAUER, J.B. e MARTIN, R.C., 1997 "Californium-252 production and neutron source fabrication" *Californium-252, Isotope for 21st Century Radiotherapy*. pp-7-24. Kluwer Academic Publishers.
- [8] CASALI, F., CHIRCO, P., ZANARINI, M., 1995, "Advanced Imaging Techniques: a New Deal for Neutron Physics" In: *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 18 série 3, n. 10, Editrice Compositori, Bologna, Italy.