0

Inspeções não-destrutivas com neutrongrafia térmica

V. R. Crispim
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia,
Caixa Postal 68509, Bloco G, Sala 206,
Ilha do Fundão, Cidade Universitária - 21945-970 - Rio de Janeiro, RJ
E-mail: VERGINIA@ LMN.CON.UFRJ.BR.
and
J. J. G. Silva
Instituto de Engenharia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear,
Caixa Postal 68550, Ilha do Fundão,
Cidade Universitária - 21945-970 - Rio de Janeiro, RJ

Recebido em 24 de outubro, 1994

No canal J-9 do reator de pesquisa Argonauta do IEN/CNEN, encontra-se instalado um dispositivo para a realização de Ensaios Não-Destrutivos com Neutrongrafias (NR). O aprimoramento do sistema neutrongráfico tem possibilitado investigações qualitativas e quantitativas em alguns campos de aplicação da técnica. Os resultados obtidos tem sido bastante animadores, no que se refere às detecções de corrosões ocultas na liga de alumínio AA7075 utilizada em aeronaves; de impurezas espalhadoras e absorvedoras de nêutrons em aço e lucite; de microfissuras em concreto de alta resistência; de materiais radioativos, explosivos, inclusões metálicas e hidrogenadas ocultas por invólucros metálicos de altas densidades atômicas.

In the J-9 channel of the Argonauta research reactor of the IEN/CNEN, is installed a device for the Non Destructives Inspections with neutron radiographies. The improvement of the Neutron Radiographic System has allowed qualitative e quantitative inspections in some applications. The results are very encouraging, such as the detection of hidden corrosion in 7075 aluminum alloy employed in aircrafts; detection of neutron absorber and scatterer impurities in steel and lucite; detection of microcracks in high resistence concrete; radioactive materials, explosives, etc.

I. Introdução

A radiografia com nêutrons (Neutrongrafia) tem sido utilizada em ensaios nucleares, industriais, biomédicos, metalúrgicos, arqueológicos e na inspeção de explosivos (Berger, 1965). É uma técnica extremamente eficiente em Ensaios Não-Destrutivos (END), seja como complementar à radiografia por raios-X ou por raios γ, seja em outras áreas especializadas. O desenvolvimento de novos métodos de detecção e de novos arranjos de feixes de nêutrons tem estimulado o surgimento de novas aplicações da radiografia com nêutrons (Barton, 1976).

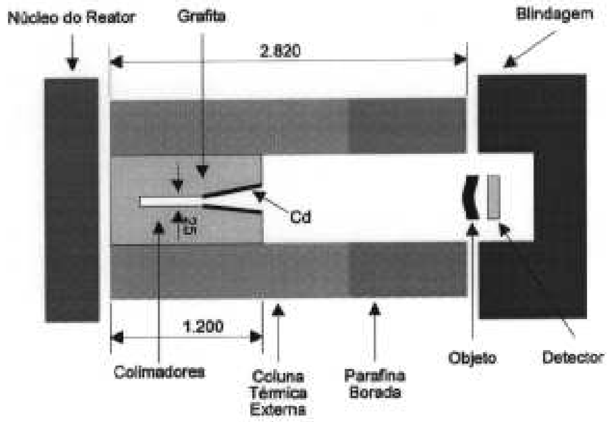
Basicamente, uma instalação radiográfica com nêutrons é composta por três elementos: uma fonte, um conversor e um dispositivo para registro e visualização das imagens. O feixe de nêutrons pode ser obtido a partir de um reator nuclear, de uma montagem subcrítica, de uma fonte radioativa ou de um acelerador. Os fatores a serem considerados na escolha da fonte são: intensidade e energia dos nêutrons produzidos, razão nêutrons/raios-γ, custo, tamanho, portabilidade e blindagem necessária. Os reatores são as fontes preferidas porque fornecem altos fluxos de nêutrons térmicos.

Há dois modos de se realizar uma neutrongrafia: utilizando-se filmes radiográficos convencionais, que caracteriza um sistema passivo de inspeção; e outro, por meio de sensores eletrônicos de imagens, que permitem a inspeção em tempo real. O primeiro proporciona boa resolução e alta sensibilidade, mas requer mais tempo, por causa do processo de revelação do filme. Por outro lado, para se observar eventos dinâmicos e testar muitas amostras, um sistema radiográfico com nêutrons em tempo real (*"Televisão com Nêutrons"*) é o mais adequado, porém, produz imagens de resolução mais pobre e de mais baixo contraste, relativamente às obtidas com filmes (Fujine, S.; Yoneda, K.; Kanda, K.;1983 - Bihari, T.E.; Gopinat, P.; 1992).

Obtêm-se uma neutrongrafia típica ao se usar como registrador de imagem uma folha conversora de material apropriado em contato íntimo com um filme radiográfico, num dispositivo a prova de luz. Esse conjunto de materiais mais o objeto, adequadamente expostos a um feixe colimado de nêutrons, fornecem, *"a priori"*, uma imagem neutrongráfica. A folha de material conversor é necessária porque os nêutrons, por serem radiações particuladas não ionizantes, praticamente não produzem efeito direto sobre o filme radiográfico. O feixe neutrônico que incide sobre a amostra em inspeção será modulado de acordo com as propriedades de transmissão do material que a constitui. O feixe emergente atravessa o filme praticamente sem sofrer atenuação e, pelo processo de captura nêutron-núcleo, é fortemente atenuado pelo material conversor. Ao absorverem nêutrons, os núcleos do material conversor emitem radiações ionizantes que são espalhadas e formam uma imagem latente no filme.

Método experimental

A fonte de nêutrons utilizada para a realização das neutrongrafias foi o reator Argonauta do IEN/CNEN. O sistema neutrongráfico esquematizado na Fig. 1 está instalado no canal de irradiação denominado J-9, na coluna térmica externa do reator. O arranjo é constituído de dois colimadores. O primeiro é um colimador paralelo de grafita com 60 cm de comprimento e orifício longitudinal com 2,5 cm de diâmetro. O segundo é um colimador divergente de grafita com 60 cm de comprimento e orifício longitudinal igual a um tronco de pirâmide com bases quadradas de 16,0 cm^2 e 50,0 cm^2, revestido na parte final, com 0,5 mm de espessura de cádmio. Como detector de imagens neutrongráficas, pelo método da exposição direta, foi utilizado o gadolínio metálico com 50 μm de espessura e o filme radiográfico do tipo Industrex M, fabricado pela Kodak. Um resumo das características gerais do aparato experimental utilizado complementa a Fig. 1.



Características gerais de exposição

Fonte	Argonauta
Potência	170 W
Fluxo$^{(*)}$	2,5 x 10^5 n.cm^{-2}.s^{-1}
Razão n/γ $^{(*)}$	3 x 10^6 n.cm^{-2}.mR
Razão L/D	110
^{R}CD	20
Espectro	~ Maxwelliano E_p = 30 meV
Conversor	Gd (50 μm)
Filme	Kodak Industrex M
$^{(*)}$ **no plano da imagem**	

Figura 1: Diagrama esquemático da montagem experimental e características gerais de exposição.

Desde os trabalhos pioneiros de J. John e W.E. Dance, 1976, a detecção neutrongráfica de diversos tipos de corrosão em estruturas de alumínio tem resultado em muitas aplicações, especialmente na manutenção de aeronaves comerciais e militares (J.P. Barton, 1989 e H.U. Mast, 1989). Crispim, V.R., 1993, visando a detecção de corrosão oculta em liga de alumínio utilizada na indústria aeronáutica, por tomografia computadorizada com a técnica neutrongráfica, precisou, inicialmente, construir Indicadores de Sensibilidade Neutrongráfica para o sistema instalado no canal J-9, de forma a determinar seu limite de detecção. Esses Indicadores consistiram de duas placas de alumínio, liga AA7075, com 10 mm de espessura e área útil de 80 mm por 60 mm. Nas placas foram feitas cavidades de 10, 4, 2 e 1 mm de diâmetros, com profundidades de 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 e 8,0 mm, conforme ilustra a Fig. 2(a). As cavidades de uma das placas foram preenchidas com $Al(OH)_3$, principal constituinte dos produtos de corrosão no alumínio. Durante a exposição neutrongráfica, as duas placas foram ainda cobertas com uma outra da mesma liga de alumínio, de igual espessura, de forma a ocultar as corrosões. Usando o procedimento anterior, inspecionou também esses Indicadores, quando ocultos por 3,0 mm de lucite.

Outros Indicadores de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de defeitos inclusos foram construídos, em forma de escalonados de aço e lucite, cujos desenhos esquemáticos podem ser vistos nas Figs. 3(a) e 4(a), respectivamente. Na Fig. 3(a), observa-se que, num dos escalonados de aço, nos centros de cada degrau, fez-se furos nas suas laterais que foram preenchidos, numa delas, por fios de nylon de 0,8 mm de espessura (impureza bastante espalhadora de nêutrons térmicos). Na outra lateral, os furos foram preenchidos por fios de cádmio com 1,0 mm de espessura (impureza bastante absorvedora de nêutrons térmicos). Na Fig. 4(a), o mesmo procedimento foi realizado, entretanto, deixando os furos, numa das laterais do escalonado, sem preenchimento com impurezas (vazios) e, na outra, preenchendo-os integralmente com fios de cádmio de 1,0 mm de espessura. (Crispim, V.R.; Silva, J.J.G e Borges, J.C., 1993-b).

Conhecido o limite de detecção de corrosões ocultas no alumínio do Sistema Neutrongráfico instalado no canal J-9, conforme montagem experimental mostrada na Fig. 1, um protótipo de mesa tomográfica foi construído para a realização de tomografias com neutrongrafias térmicas (Crispim, V.R., 1993), inspecionando-se um tarugo cilíndrico de alumínio (liga AA7075), com 33 mm de diâmetro e 35 mm de altura, dividido em duas seções, onde foram feitas cavidades semi-esféricas com 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mm de diâmetro, respectivamente, conforme mostra a Fig. 5(a). As cavidades foram preenchidas com $Al(OH)_3$, sendo que dois pinos de encaixe permitiam a superposição correspondente a cada uma das seções, simulando corrosões ocultas esféricas.

O estudo de microfissuras em concreto estrutural é de particular importância na Engenharia Civil, porque elas são pequenas descontinuidades que eventualmente se aglutinam nos constituintes do concreto, culminando em falhas macroscópicas. Fatias retiradas de corpos de prova específicos de concreto estrutural de alta resistência (80 a 90 MPa e 60 a 70 MPa), com 4 mm de espessura e 100 mm de diâmetro, foram inspecionadas por neutrongrafia térmica, antes e após cargas externas serem aplicadas a esses corpos de prova. Para a inspeção das microfissuras, foi necessário o uso de um agente contrastante, a base de uma solução aquosa de Gd $(NO_3)_2$, sobre as fatias polidas para, ao impregnar as possíveis microfissuras e vazios (bolhas de ar), melhorar a capacidade de detecção, o contraste radiográfico e a definição das imagens. Dos agentes contrastantes, os compostos de gadolínio são os preferidos, porque a seção de choque do gadolínio para nêutrons térmicos é a mais alta de todas.

Outras inspeções foram realizadas, objetivando demonstrar a potencialidade da técnica neutrongráfica na localização de materiais radioativos, explosivos, anéis de vedação de borracha, inclusões metálicas e hidrogenadas, ocultados por invólucros metálicos de altas densidades atômicas.

No processamento dos filmes radiográficos, foram seguidas as recomendações do fabricante Kodak: imersão no revelador a 20° C, por 5 minutos e, no fixador, por 8 minutos.

Resultados e Conclusões

Os Indicadores de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de corrosão oculta em alumínio demonstraram que o sistema neutrongráfico instalado no canal

J-9 do reator Argonauta é capaz de detectar uma corrosão de 1,0 mm de diâmetro, oculta tanto por 19,0 mm de alumínio (AA7075), vide Fig. 2(b), como simultaneamente por 3,0 mm de lucite e 6,0 mm da mesma liga. Essa inspeção foi realizada num tempo de exposição de 90 minutos, com o filme Industrex M da Kodak e duas folhas de gadolínio de 25 μm de espessura cada, acondicionados num chassi de alumínio da marca Kodak. As densidades óticas das imagens neutrongráficas foram medidas no centro de cada área simuladora de corrosão nesses Indicadores (cavidades preenchidas e vazias), por um microdensitômetro da Perkin-Elmer/Boller & Chivens Division, modelo PDS-1010A do Observatório Nacional/CNPq/RJ e permitiram concluir que o limite de detecção da corrosão oculta do Sistema Neutrongráfico foi de 33 μm (Crispim, V.R., 1993).

Com relação aos Indicadores de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de defeitos, impurezas absorvedoras de nêutrons térmicos de 1,0 mm de diâmetro foram visualizadas pelo Sistema Neutrongráfico, ainda que ocultas por 41,0 mm de aço ou por 20,0 mm de lucite, identificadas, nas Figs. 3(b) e 4(b), pelos traços claros e assinalados por " **0** ". Quanto às impurezas espalhadoras de nêutrons térmicos, com 0,8 mm de diâmetro, o sistema conseguiu detectá-las ocultas por 23,0 mm de aço, podendo ser identificadas, na Fig. 3(b), pelos traços menos claros e mais finos, apontados por " **1** ". O sistema ainda conseguiu identificar vazios de 1,0 mm, ocultos por 10,5 mm de lucite, conforme mostra a Fig. 4(b), através dos traços pretos assinalados por " **2** ". Cada neutrongrafia dos escalonados foi obtida após 60 minutos de exposição. (Crispim, V.R.; Silva, J.J.G. e Borges, J.C.; 1993-b).

A Fig. 5(b) mostra a projeção neutrongráfica correspondente a incidência normal do feixe neutrônico sobre o tarugo (representado na Fig. 5(a) por uma de suas seções transversais), em relação ao eixo de rotação da mesa tomográfica (ângulo de projeção a 0°). A corrosão de 1,0 mm de diâmetro oculta no tarugo de alumínio com 33 mm de espessura é nitidamente visualizada na neutrongrafia, à esquerda, por um ponto branco, assinalado por uma seta. A neutrongrafia foi obtida em 30 minutos de exposição com o filme Industrex A-5 da Kodak e duas folhas de gadolínio com 25μm de espessura cada. (Crispim, V.R., 1993).

Na Fig. 6(a), a neutrongrafia de uma fatia retirada de um corpo de prova de concreto com alta resistência a compressão (80-90 MPa) e submetido à carga externa de 38 MPa é apresentada. A não uniformidade da carga aplicada foi responsável pela quebra parcial da amostra, quando da sua retirada. A Fig. 6(b) refere-se a neutrongrafia de uma fatia retirada de um corpo de prova de alta resistência à compressão (60-70 MPa), submetida à carga de 25 MPa. As neutrongrafias revelam nitidamente a aglutinação dos constituintes do concreto: brita, grãos de arenitos (manchas pretas de contorno irregular) e a argamassa de cimento (fundo claro). A detecção dos graos de arenitos pela neutrongrafia confundiu as localizações dos vazios (bolhas de ar) dentro da matriz de concreto. Por isso, o uso de um agente contrastante serviu para visualizá-los melhor, caracterizando-os como pequenas manchas claras de contorno circular, assinalados nas figuras por setas. A atuação do agente contrastante sobre as britas e a argamassa de cimento foi bastante eficiente, realçando suas bordas, cujos aspectos são de linhas finas e claras, sugerindo o aparecimento de **fissuras**, pois, se houve penetração desse agente, foi porque ele encontrou espaço para tal. As larguras dessas linhas, justificadas, a princípio, por esse efeito de absorção em certas regiões da amostra, confirmaram se tratar realmente de microfissuras, após tê-las dimensionado como da ordem de 30 a 40μm, por um microscópio ótico OLYMPUS-308492, usado numa ampliação de 75x. Apesar do fator porosidade das britas interferir na detecção neutrongráfica das microfissuras, suas larguras, sendo função da carga externa aplicada, relativamente à resistência do concreto à compressão, foram bem discriminadas também pelo sistema neutrongráfico. Essas microfissuras podem permitir uma maior permeabilidade de água e de várias outras substâncias corrosivas, acelerando o processo de deterioração, sendo mais prováveis de ocorrer em zonas mais susceptíveis, tais como as de interfaces entre a argamassa de cimento e o agregado, o que demonstra a importância da técnica neutrongráfica na avaliação de estruturas de concreto como, por exemplo, as de contenção de reatores nucleares. Cada neutrongrafia exigiu um tempo de exposição de 145 minutos. (Silva, J.J.G., Crispim V.R., LIMA, R.M.G., 1994).

A Fig. 7(a) mostra que a inspeção neutrongráfica de um receptáculo contendo uma fonte de irídio-192, usando o método de transferência (Berger, H., 1965), foi capaz de localizá-la em sua extremidade esquerda (Silva, J.J.G., 1988). Na Fig. 7(b), a neutrongrafia de munições de diversos calibres serviu para mostrar a distribuição interna granular de pólvora, representada pela região mais escura e assinaladas por "+". Na Fig. 7(c), diversas inclusões metálicas (ex.: Cd, Pb), anéis de vedação internos e externos de borracha, furos vazados, pastilha de $Al(OH)_3$ simulando corrosão são perfeitamente distinguíveis na neutrongrafia apresentada.

Os resultados obtidos nas investigações qualitativas e quantitativas com a técnica neutrongráfica tem sido bastante animadores, conforme procurou-se demonstrar aqui, porém, são ainda esperados avanços tecnológicos no que concerne a: (a) implantação de um sistema transportável de nêutrons térmicos capaz de viabilizar a realização dos ensaios neutrongráficos no local da irradiação; (b) desenvolvimento de telas conversoras nacionais de nêutrons; (c) desenvolvimento de um Sistema Neutrongráfico em Tempo Real; e (d) construção de uma camera neutrongráfica portátil.

References

1. J.P. Barton, Neutron radiography - au overview, In: BERGER, Harold (Ed.), Practical applications of neutron radiography and gagin. Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1976, p.5-19 (ASTM STP 586).
2. H. Berger, *Neutron Radiography; Methods, Capabilities and Applications*, Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1965, 146p.
3. T.E. Bihari, P. Gopinath, Object-oriented real-time systems: concepts and examples. Computer, Los Alamitos, V.**25**, n.12, 25 (1992).
4. V.R. Crispim, J. J. G. Silva, J. C. Borges, Non Destructive Testing of Defects by Neutron Radiography-II, Encontro Nacional de Aplicações Nucleares (Caxambú, MG, Out. 25-29) ABEN, 1993, p.p. 139-40.
5. V.R. Crispim, R.T. Lopes, J.C. Borges, "Reconstrução de imagem usando neutrongrafias". In: Congresso Geral de Energia Nuclear, 1, 1986, Rio de Janeiro. Anais, Rios de Janeiro: ABEN, 1986A, V. 2, p. 39-42.
6. V.R. Crispim, J.J.G. Silva, J.C. Borges, "Aluminum corrosion detection by neutron radiography. In: Encontro Nacional de Aplicações Nucleares, 2, 1993-a, Caxambú. Anais, São Paulo: ABEN, 1993, p. 137-138.
7. V.R. Crispim, Desenvolvimento de Ensaios Não Destrutivos com Neutrongrafia. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993 (Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético), p. 82-84, 99-101.
8. V.R. Crispim, J.J.G. Silva, J.C. Borges, Non Destructive Testing of Defects by Neutron Radiography-II, Encontro Nacional de Aplicações Nucleares (Caxambú, MG, Out. 25-29) ABEN, 1993, p.p. 139-40.
9. W.E. Dance, "Neutron Radiography Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures", Pratical Applications of Neutron Radiography and Gaging, ASTM STP 586, Americam Society for Testing and Materials, Philadelphia, 137.
10. S. Fujine, K. Yoneda, K. Kanda, An on-line vídeo image processing system for real-time neutron radiography. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Amsterdam, V. 215, n. 1-2, p. 277-289, Sept. 1983.
11. J. John, "Californium Based Neutron Radiography for Corrosion Detection in Aircraft", Pratical Applications of Neutron Radiography and Gaging, ASTM STP 586, Americam Society for Testing and Materials, Philadelphia, 168- 180, 1976.
12. J.J.G. Silva, V.R. Crispim, R.M.G. Lima, "Aplicação da Técnica Neutrongráfica na Inspeção da Estrutura Interna e Microfissuras do Concreto". In: Congresso Geral de Energia Nuclear, V. 1994, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro: ABEN, 1994, V. 2, P. 619-622.
13. J.J.G. Silva, "Ensaios Neutrongráficos com o Reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear". In: Congresso Geral de Energia Nuclear, II, 1988, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro: ABEN, 1988, V. 2, P. 181-189.

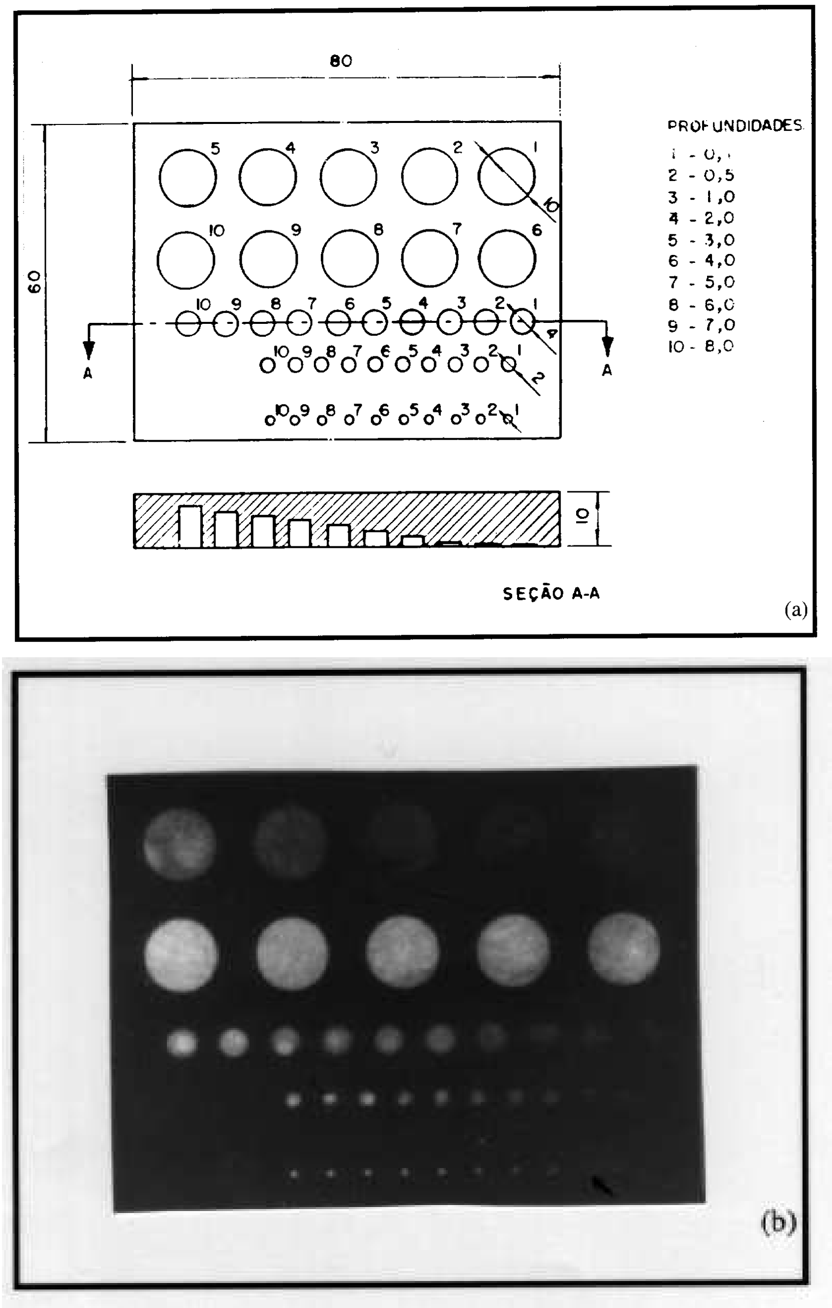


Figura 2: Desenho esquemático de um Indicador de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de corrosão oculta no alumínio (liga AA7075); (b) Neutrongrafia do Indicador mostrado em (a).

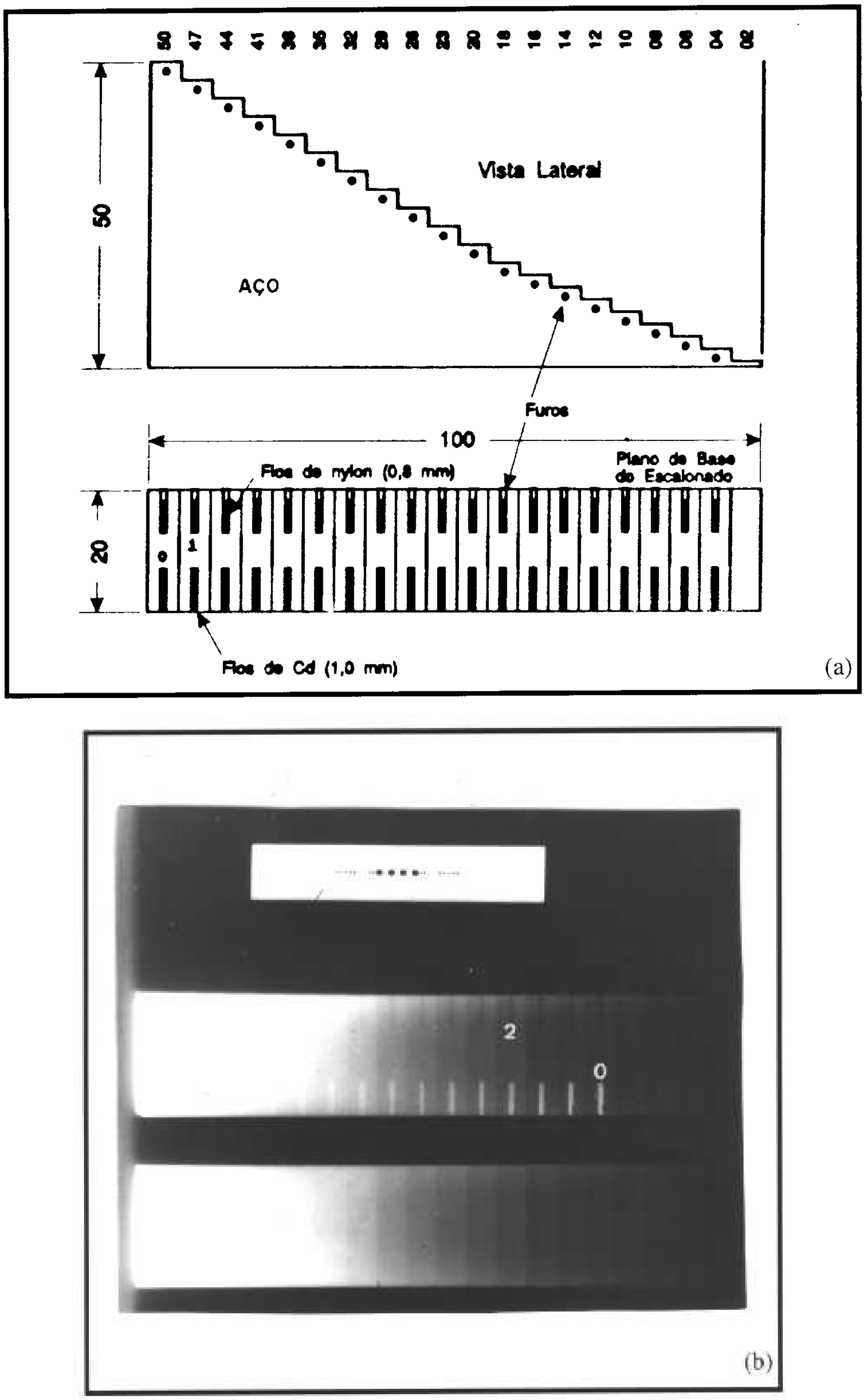
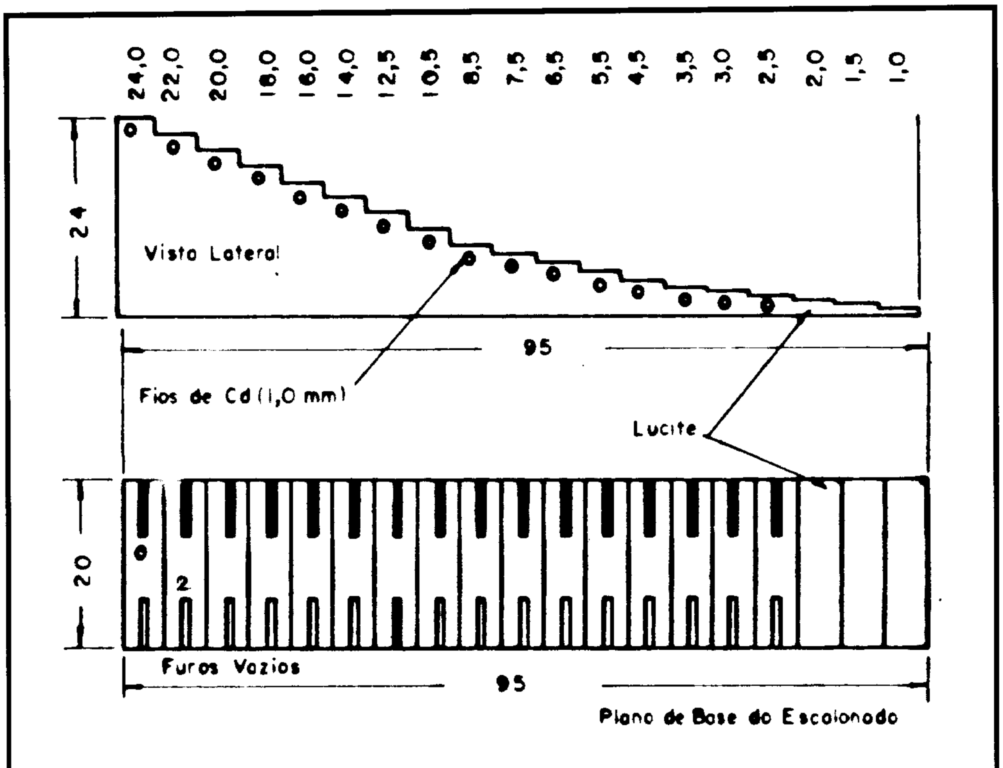
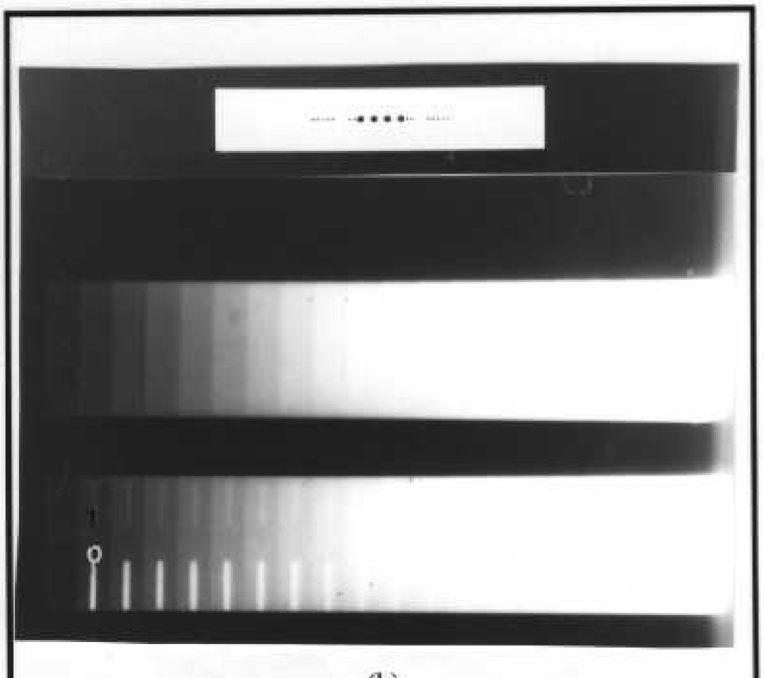


Figura 3: Desenho esquemático de um Indicador de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de defeitos no aço; (b) Neutrongrafia do Indicador esquematizado em (a).

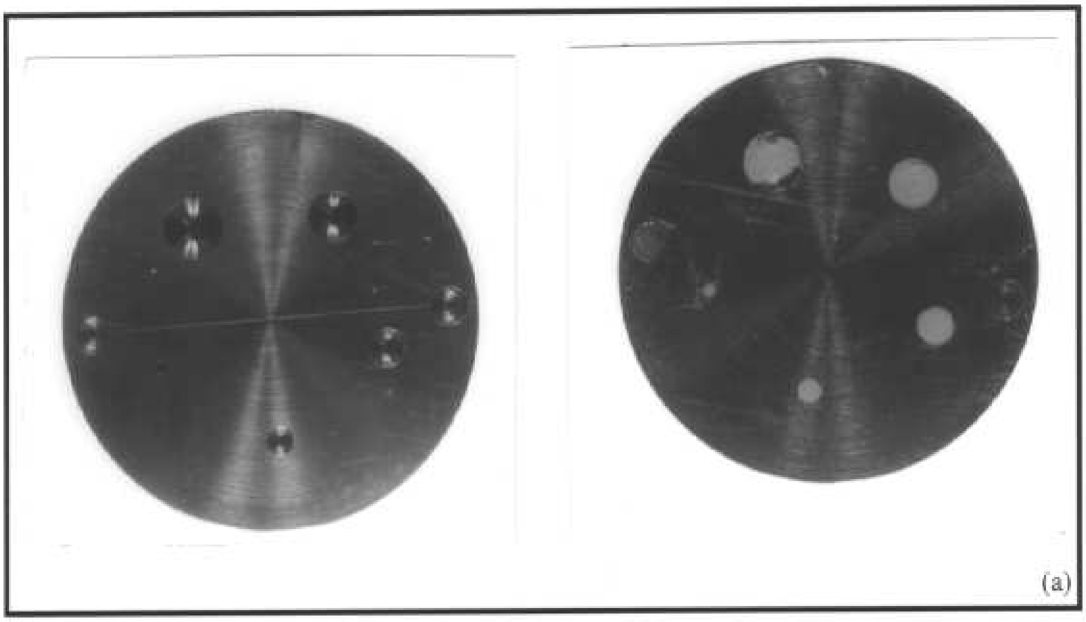


(a)



(b)

Figura 4: Desenho esquemático de um Indicador de Sensibilidade Neutrongráfica para detecção de defeitos no lucite; (b) Neutrongrafia do Indicador esquematizado em (a).



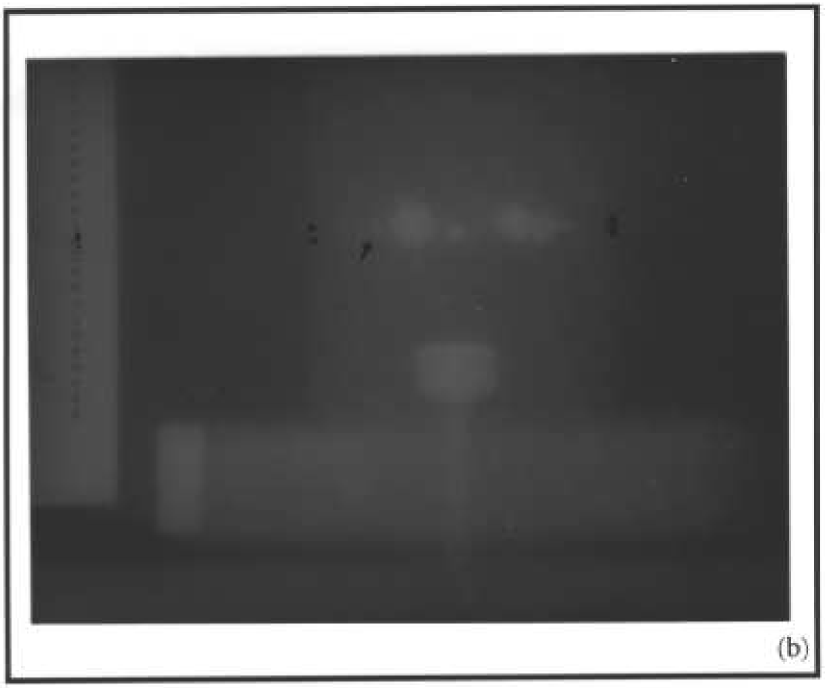
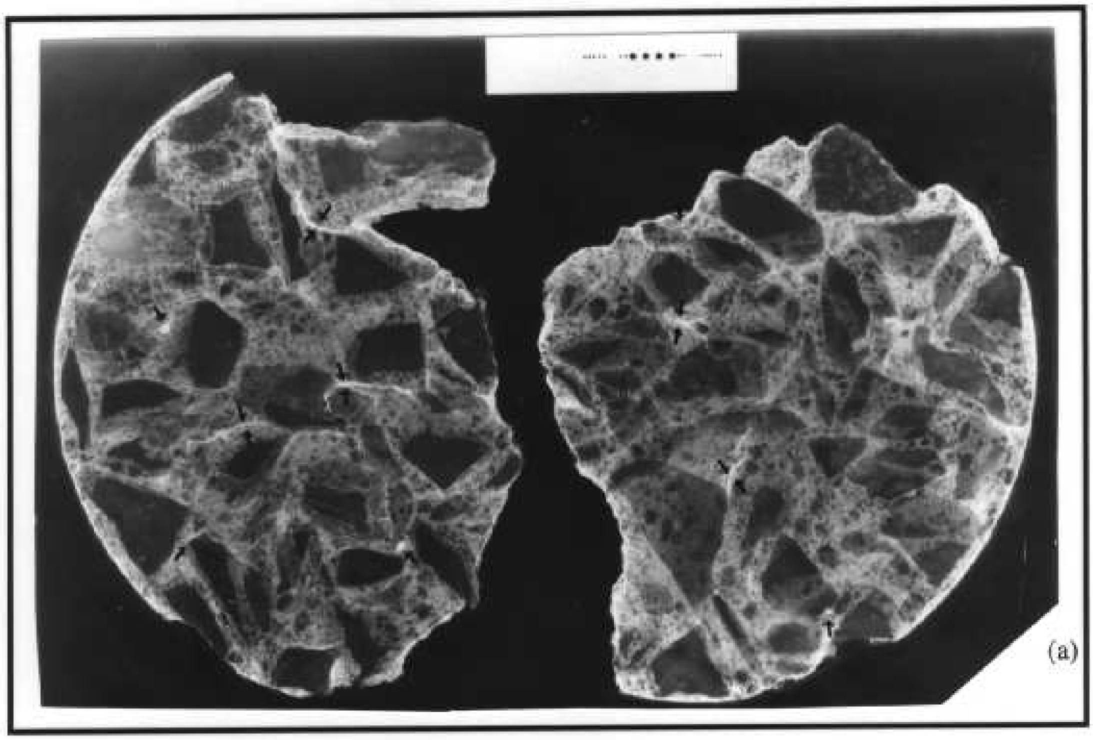


Figura 5: (a) Fotografias de seções transversais de um tarugo cilíndrico de alumínio (liga AA7075) contendo cavidades semi-esféricas com 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mm de diâmetro; (b) Neutrongrafia do tarugo cilíndrico contendo as corrosões ocultas simuladas à direita de (a).



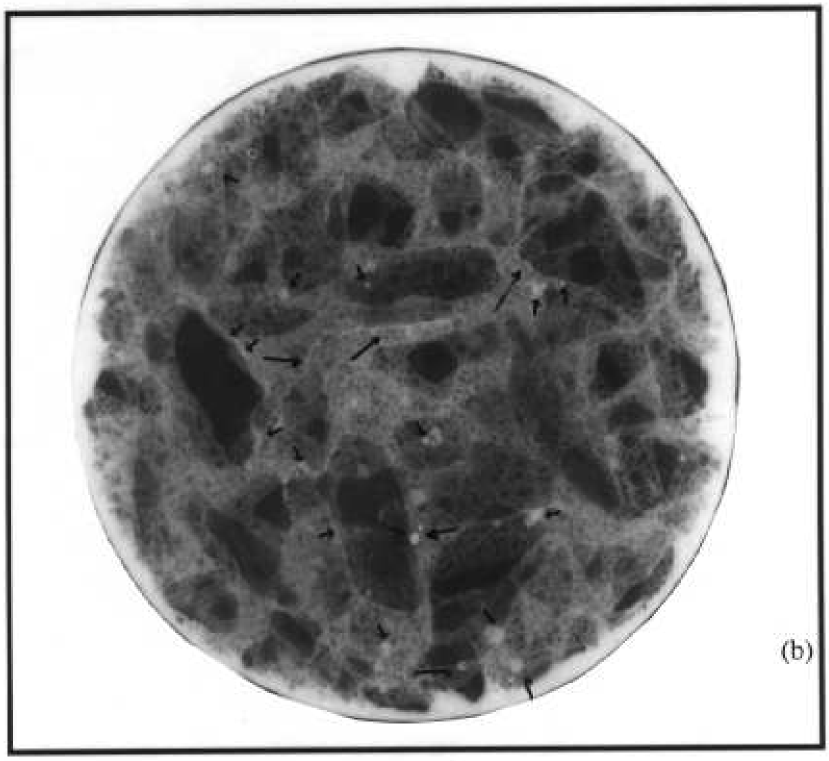


Figura 6: Neutrongrafia de uma fatia de concreto de alta resistência (80-90 MPa) submetida a carga de 38 MPa; (b) Neutrongrafia de uma fatia de concreto de alta resistência (60-70 MPa) submetida a carga de 25 MPa.

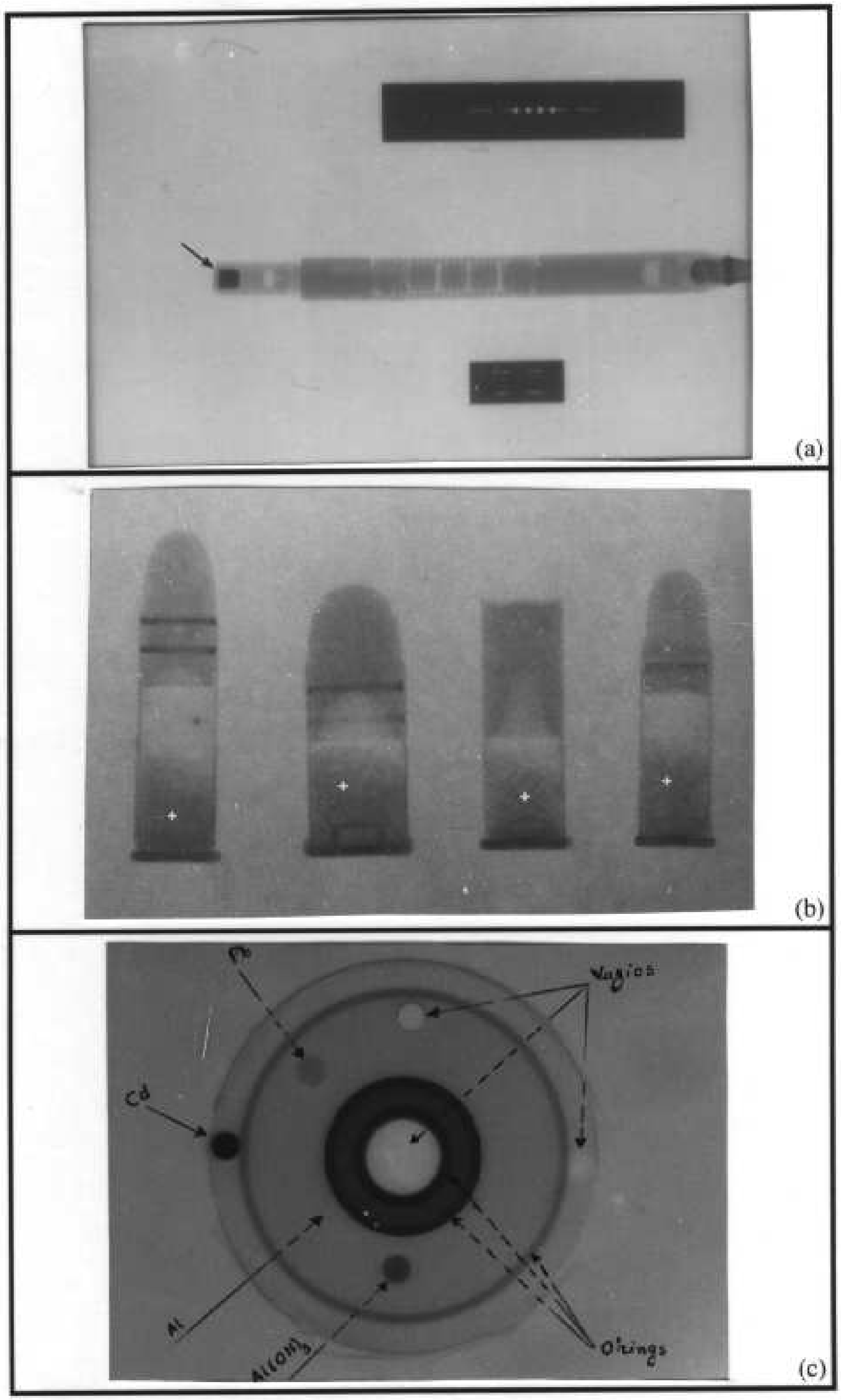


Figura 7: (a) Neutrongrafia de um receptáculo com fonte de Irídio-192 em sua extremidade; (b) Neutrongrafia de munições de diversos calibres; (c) Neutrongrafia de uma peça de alumínio contendo inclusões e vazios (cópias positivas).