

IMAGEAMENTO COM NÊUTRONS NO IPEN-CNEN/SP

Grupo de imageamento com nêutrons

Centro do Reator de Pesquisas – IPEN-CNEN/SP
Av. Prof Lineu Prestes, 2242
05508-000 São Paulo – SP

RESUMO

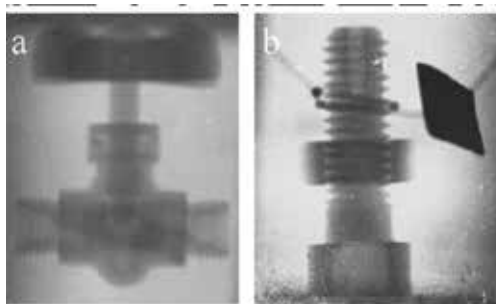
O imageamento com nêutrons pode ser definido como um conjunto de técnicas que fazem uso do nêutron como radiação penetrante para investigar a estrutura interna de um objeto, e dentre estas estão as de radiografia (2D) e de tomografia (3D). O texto abaixo traz uma breve sinopse das atividades e dos resultados importantes, referentes à estas técnicas, que foram obtidos pelo grupo de trabalho do IPEN-CNEN/SP, mediante a utilização do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1, entre os anos de 1987 e 2019.

1. INTRODUÇÃO

As atividades referentes à técnica da radiografia com nêutrons se iniciaram na Divisão de Física Nuclear, antiga TFF, do IPEN-CNEN/SP em meados de 1987, mediante alguns estudos preliminares da viabilidade de se obter imagens em

polímeros, quando irradiados com nêutrons, oriundos do reator nuclear de pesquisa IEA-R1[1,2]. Estes estudos foram realizados inicialmente utilizando o feixe de nêutrons frios do canal de irradiação BH03, em que operava um espectrômetro tipo filtro de berílio-tempo de voo, obtendo-se os parâmetros para caracterização da técnica da radiografia com nêutrons em detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD). A Figura 1 mostra duas das primeiras imagens radiográficas (neutronografias) obtidas, publicadas em 1987[2]. Posteriormente, foram realizados outros testes de viabilidade utilizando o feixe de nêutrons térmicos do BH10, em que operava um espectrômetro três eixos. Neste canal foram necessárias algumas adaptações, como o emprego de filtros de chumbo para minimizar a intensidade da radiação gama vinda do núcleo do reator [3,4]. Entre 1987 e 1991, foram realizados vários trabalhos de aprendizagem neste canal de irradiação, permitindo estabelecer as condições experimentais acerca da obtenção de imagens radiográficas tanto em SSNTD como em filmes convencionais de emulsão utilizados normalmente em radiografias com raios-X [5-8].

Figura 1 – Primeiras neutronografias obtidas no BH03 do reator IEA-R1. Válvula tipo agulha (a); parafuso de aço (b).



Em 1992, o grupo de trabalho de radiografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP instalou no BH08 do mesmo reator, um equipamento totalmente projetado e desenvolvido por seus componentes, e que ficou em operação até 1997. Em 1998 foi otimizado no sentido de facilitar a manipulação e posicionamento preciso de amostras. Nesta mesma época foram feitos diversos testes de viabilidade para sua aplicação na inspeção de airbags, e de microrrachaduras em concreto [9]. A Figura 2 mostra os componentes do grupo de trabalho desta época. Desde então, o grupo de Imageamento com Nêutrons vem se dedicando ao aprimoramento desta técnica em um equipamento de excelência, tanto para pesquisas quanto para a formação de pessoal técnico/científico especializado [10-13].

Figura 2 – Equipamento para radiografia com nêutrons instalado no BH08, 1998.

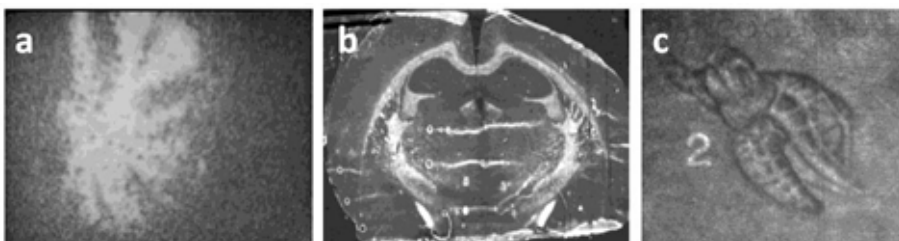


2. TRABALHOS REALIZADOS

Entre 1997 e 2009 o grupo de trabalho desenvolveu diversas atividades, para a obtenção de imagens com nêutrons no equipamento instalado no BH08, das quais:

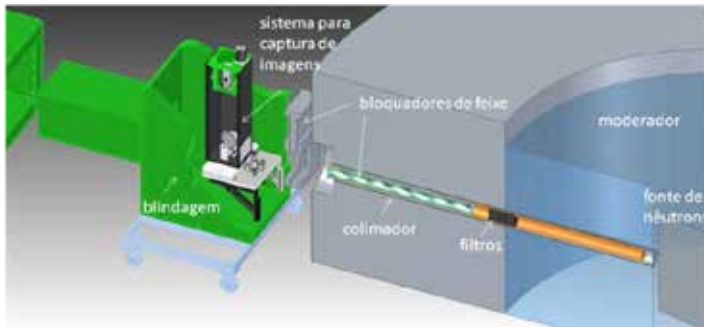
- estabelecer as bases quantitativas para a obtenção de imagens com nêutrons utilizando SSNTD [13,14,19,24,25];
- implementar as bases para a obtenção de imagens com nêutrons utilizando filmes de emulsão [9,10,15,18,20,21,23,26];
- imageamento em tempo-real para o estudo de processos dinâmicos de movimento de líquidos mesmo se envoltos por espessas camadas de metais [16,17];
- radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons para o estudo de materiais extremamente finos (Figuras 3a e 3b) [22,27,28];
- radiografia com elétrons induzidas por nêutrons para o estudo de materiais extremamente finos (Figura 3c) [23,26].

Figura 3 – Radiografia induzida por nêutrons: colônia de bactérias (a); corte histológico tecido cerebral de camundongo (b); marca d'água em nota brasileira (c).



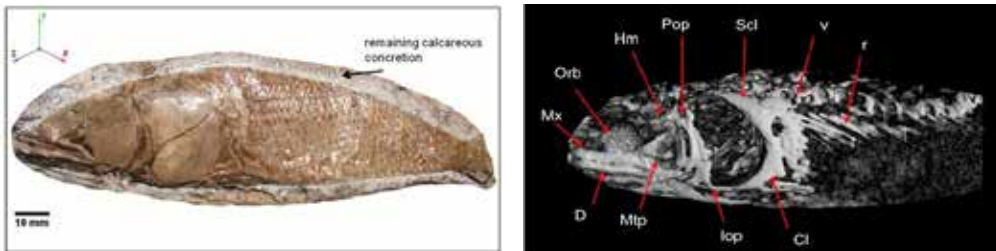
Em 2009 se iniciou o projeto para construção e instalação de um equipamento para Tomografia com Nêutrons no BH08 e, em meados de 2010, este foi transferido para o BH14 do mesmo reator, onde está operacional desde 2011 [29]. A Figura 4 é um diagrama deste equipamento, no qual estão destacados alguns dos seus componentes. A seguir estão apresentados exemplos de estudos realizados neste equipamento.

Figura 4 – Diagrama do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.



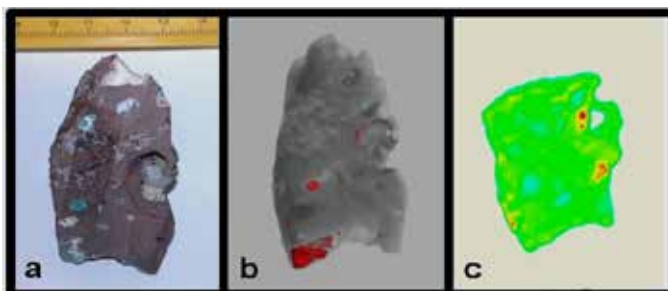
- **Paleontologia** – Estrutura osteológica de peixe fóssil (IPEN-IGEO-USP) [30].

Figura 5 – Fóssil “*Notelops Brama*” e imagem 3D evidenciando suas estruturas osteológicas.



- **Geologia** – Distribuição de Crisocola em minérios (IPEN-IGEO-USP) [31].

Figura 6 – Minério (a); imagem geral 3D (b); fatia tomográfica evidenciando a crisocola (vermelho) (c).

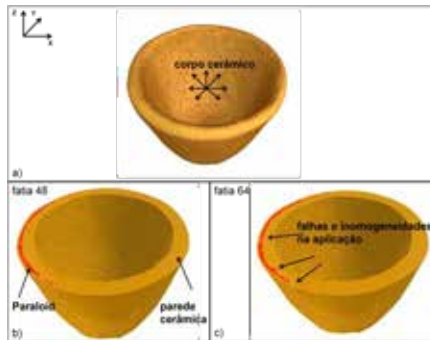


- **Arqueologia** – Conservação de vaso cerâmico indígena (Macuxí) com Paraloid [32].

Figura 7 – Vaso cerâmico indígena.



Figura 8 – Imagens 3D mostrando a localização(vermelho) do Paraloid.



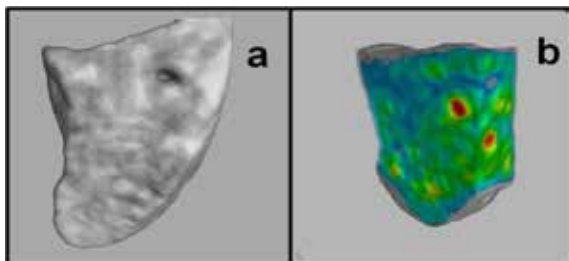
3. EVOLUÇÃO DA TÉCNICA

O grupo de imageamento com nêutrons desenvolveu quatro métodos experimentais para a evolução da técnica: 1) determinação da divergência angular do feixe de nêutrons (penumbra); 2) avaliação do consenso de que a técnica de imageamento com nêutrons é não destrutiva; 3) verificação da viabilidade de identificação de materiais por tomografia; 4) avaliação da distribuição de água em células de combustível à hidrogênio [33,34].

4. TRABALHOS NO ESTADO DA ARTE

Geologia – Início dos estudos para determinação qualitativa e quantitativa da concentração de óleo em rochas reservatório de petróleo. A Figura 9 ilustra duas das imagens obtidas.

Figura 9 – Imagens 3D: geral (a); distribuição de óleo (diversas cores) no interior do minério (b).



Round Robin – Em 2018, a Agência Internacional de Energia Atômica propôs a realização de uma atividade internacional entre os institutos que possuem equipamentos de excelência para tomografia com nêutrons, visando o estudo comparativo em um conjunto de amostras padrões desenvolvidos no Instituto Paul Scherrer. O IPEN faz parte dos laboratórios selecionados, para participar deste estudo.

REFERÊNCIAS

1. MORAES, M. A. P. V.; PUGLIESI, R.; KHOURI, M. T. F. C. *Determinação de boro em soluções aquosas, empregando um feixe de nêutrons filtrado, pela técnica do registro de traços*. 1985. 6 p. (IPEN-PUB-86). Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/25037>.
2. PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V. Aspectos qualitativos da neutrongrafia pela técnica do registro de traços. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 39, n. 8, p. 772-774, 1987.
- 3 – MENEZES, M. O.; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons pelos métodos de conversão direta e indireta. *In: 44ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 12-17 jul. 1992, São Paulo – SP.
4. MENEZES, M. O. *Desenvolvimento e aplicação da técnica da radiografia de nêutrons por conversão direta e indireta*. 1994. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares (IPEN/CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1994. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10366>.
5. PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V.; YAMAZAKI, I. M.; ACOSTA, C. F. Neutronography experiments at the IEA-R1 nuclear research reactor. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR DATA FOR SCIENCE*

- AND TECHNOLOGY, 30 maio-3 jun. 1988, Mito/Japan, 1988. p. 1095-1097. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/14754>.
6. PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V.; YAMAZAKI, I. M.; ACOSTA, C. F. Radiografia com nêutrons no reator nuclear IEA-R1. *In: 2º CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR*, 24-29 abr. 1988, Rio de Janeiro – RJ. 1988. p. 161-170. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/13028>.
7. PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V.; YAMAZAKI, I. M. Characteristics of some track detectors applied for neutron radiography. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A. Appl. Radiat. Isot.*, v. 41, n. 6, p. 601-605, 1990.
8. PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V.; YAMAZAKI, I. M. Characteristics of some track detectors for neutron radiography. *In: 3º CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR*, 22-27 jul. 1990, Rio de Janeiro – RJ. *Anais [...]*, 1990. p. 18-25.
9. PUGLIESI, R.; ANDRADE, M. L. G. Study of cracking in concrete by neutron radiography. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 48, n. 3, p. 339-344, 1997.
10. PUGLIESI, R.; MENEZES, M. O.; ASSUNÇÃO, M. P. M. Detection of aluminium corrosion products by neutron radiography. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A Applied Radiation Isotopes*, v. 43, n. 5, p. 663-665, 1992.
11. ASSUNÇÃO, M. P. M.; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons utilizando detectores de traços nucleares de estado sólido. *In: 44ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 12-17 jul. 1992, São Paulo – SP.
12. MENEZES, M. O.; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons pelos métodos de conversão direta e indireta. *In: 44ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 12-17 jul. 1992, São Paulo – SP.
13. ASSUNÇÃO, M. P. M.; PUGLIESI, R.; MENEZES, M. O. Characteristics of the solid state nuclear track detector CN-85 for neutron radiography. *In: 4th WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY*, May 10-16, 1992, San Francisco, California.
14. ASSUNÇÃO, M. P. M. *Desenvolvimento da técnica de radiografia com nêutrons pelo método do registro de traços nucleares*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. 86p.
15. MENEZES, M. O. *Desenvolvimento e aplicação da técnica da radiografia com nêutrons por conversão direta e indireta*. 1994. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade

de São Paulo (USP), São Paulo. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10366>.

16. MENEZES, M. O. *Radiografia com nêutrons em tempo real*. 2000. 79 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/9284>.

17. MENEZES, M. O.; PUGLIESI, R.; PEREIRA, M. A. S.; ANDRADE, M. L. G. Real-time neutron radiography at the IEA-R1m nuclear research reactor. *Braz. J. Phys.* v. 33, n.2, p. 282-285, jun. 2003.

18. PUGLIESI, R.; GERALDO, L. P.; MENEZES, M. O.; ANDRADE, M. L. G.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; Maizato, M. S. Inspection of an artificial heart by the neutron radiography technique. *In: 3rd INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NR*. March 16-19, 1998, Lucerne – Switzerland.

19. PEREIRA, M. A. S. *Emprego dos policarbonatos Makrofol-DE e CR-39 em radiografia com nêutrons*. 2000. 81 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações). – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

20. ANDRADE, M. L. G. *Caracterização de sistemas filme-conversor para radiografia com nêutrons*. 2002. 75 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10986>.

21. IAEA. *Neutron imaging: a non-destructive tool for materials testing*. Vienna/Áustria, IAEA- TECDOC-1064, 2008. 136 p. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1604_web.pdf.

22. PEREIRA, M. A. S. *Radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons*. 2008. 103 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. DOI: 10.11606/T.85.2008.tde-10062008-144720.

23. ANDRADE, M. L. G. *Radiografia com elétrons induzidos por nêutrons*. 2008. 79 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. DOI:10.11606/T.85.2008.tde-11062008-093842.

24. PUGLIESI, F. *Caracterização do Duroton como detector de traços nucleares de estado sólido*. 2008. 75 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações)

- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. DOI:10.11606/T.85.2008.tde-20082009-191238.
25. PUGLIESI, F.; SCIANI, V.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R. Digital system to characterize solid state nuclear track detectors. São Paulo, *Braz. J. Phys.*, v. 37, n. 2a, p. 446-449, jun. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-97332007000300017>.
26. PUGLIESI, R.; ANDRADE, M. L. G.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, F. Neutron-induced electron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v. 542, p. 81-86, 2005.
27. STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron induced radiography a new technique to inspect the internal structure of thin samples. *Brazilian Journal of Physics*, v. 38, n. 3A, p. 346-349, 2008.
28. STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron-induced alfa- radiography. *Radiation Measurements*, v. 43, p. 1226-1230, 2008.
29. SCHOUERI, R. M. *Projeto e instalação de um equipamento para tomografia com nêutrons no IPEN-CNEN/SP*. 2016. 93 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. DOI:10.11606/D.85.2016.tde-06052016-074255.)
30. PUGLIESI, R.; PEREIRA, M. A. S.; ANDRADE, M. L. G.; BASSO, J. M. L.; VOLTANI, C. G.; GONZALES, I. C. Study of the fish fossil *Notelops brama* from Araripe-Basin Brazil by neutron tomography. *Nuclear Instruments and Methods A*, v. 919, p. 68-72, 2019.
31. GARDA, G. M.; FILGUEIRA, D. A.; PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; SAYEG, I. J. Estudo da mineralização de cobre em basaltos do Grupo Serra Geral, utilizando difratometria de raios-X, microscopia eletrônica de varredura-espectroscopia por energia dispersiva e tomografia com nêutrons. *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, n. 3, p. 111-127, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-152501>.
32. STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R. Penetration of the consolidant Paraloid® B-72 in *Macuxi* indigenous ceramic vessels investigated by neutron tomography. *Nuclear Instruments and Methods A*, v. 889, p. 118-121, 2018.
33. PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; SCHOUERI, R. M. Method to evaluate the L/D ratio of neutron imaging beams. *Brazilian Jour. of Radiation Science*, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2017.

34. LOPES, T.; BERUSKI, O. *et al.* Spatially resolved oxygen reaction, water, and temperature distribution: experimental results as a function of flow field and implications for polymer electrolyte fuel cell operation. *Applied Energy*, v. 252, n. 113421, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113421>.