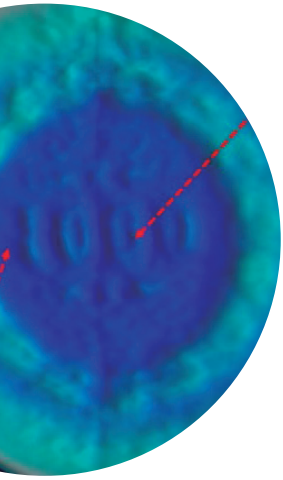
RNB Revista Numismática Brasileira

ARTIGO



ESTUDO DE MOEDAS ANTIGAS BRASILEIRAS DOS SÉCULOS XIX E XX POR TOMOGRAFIA COM NÊUTRONS

Study of ancient Brazilian coins from centuries XIX and XX by neutron tomography

Marco A. Stanojev Pereira*
Frederico A. Genezini**

RESUMO

Técnicas de imageamento não destrutivas e não invasivas como as que utilizam ultrassom, raios-X e mais recentemente nêutrons, são ferramentas importantes no estudo da estrutura interna, processos de restauro e de preservação de objetos do patrimônio histórico e cultural. No presente trabalho, foi utilizada a técnica de tomografia com nêutrons, para o estudo de duas moedas brasileiras, cunhadas em 1866 e 1929. Os resultados obtidos permitiram constatar a viabilidade desta técnica para esta finalidade, e as imagens foram obtidas no equipamento que está disponível e instalado no reator nuclear de pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.

Palavras-chave: tomografia com nêutrons, arqueometria, numismática, patrimônio histórico e cultural.

Recebido em 30/07/2025
Aprovado em 20/08/2025

*Marco A. Stanojev Pereira - É Químico, Mestre, Doutor e Pós Doutor em Tecnologia Nuclear pelo IPEN/USP. Pesquisador no RMB/IPEN, especialista em radiografia e tomografia com nêutrons. É numismata e autor de obras de historiografia, ficção e técnicos. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP. Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária CEP 05508 000, São Paulo – SP, Brasil. e-mail: mstanojev@alumni.usp.br

**Frederico A. Genezine – É Físico, Mestre e Doutor em Tecnologia Nuclear pelo IPEN/USP. Pesquisador no IPEN-CNEN/SP, especialista em instrumentação nuclear, física de reatores e aplicações nucleares como geocronologia e ativação neutrônica. É gerente do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq), e lidera o projeto do Laboratório Nacional de Feixes de Nêutrons (RMB).

ABSTRACT

Non-destructive and non-invasive imaging techniques, which make use of ultrasound, X rays and more recently, neutrons, are important tools to study the internal structure, restoring and preservation processes, of historical and cultural heritage objects. In the present paper, the neutron tomography technique was employed to inspect two Brazilian coins, minted in 1866 and 1929. The obtained results allowed verifying the potential of this technique. The images were obtained at the equipment, which is installed at the IEA-R1 nuclear research reactor of IPEN-CNEN/SP.
Keywords: neutron tomography, archaeometry, numismatic, cultural heritage

Introdução

Técnicas de imageamento não destrutivas e não invasivas, que permitam analisar a estrutura interna de objetos, são ferramentas importantes em estudos de numismática [1,2]. Dentre estas estão as de radiografia e de tomografia com raios-X, e mais recentemente e especificamente, as que empregam nêutrons como radiação penetrante [3]. Por meio desta técnica é possível visualizar a estrutura interna, não homogeneidades, não uniformidades, trincas, bolhas, mensurar espessuras, massas, volumes e densidades das amostras em estudo. Além disto é também possível determinar, em qualquer região da amostra, seja nas radiografias (2D) ou nas tomografias (3D), os coeficientes de atenuação linear dos nêutrons dos materiais que a compõe e assim ter uma concepção de sua composição [4,5].

As diferenças entre os processos de interação destas radiações com a matéria, atribuem à cada uma destas técnicas características únicas, de modo que as informações obtidas em cada uma delas podem ser utilizadas de forma complementares, de maneira que os campos de estudos e os objetos investigados se ampliam [6-8]. Por exemplo, diferentemente dos raios X, os nêutrons são capazes de penetrar vários centímetros em materiais como chumbo, ferro, cobre, aluminio, bronze, dentre outros, mas são facilmente atenuados por camadas extremamente finas de materiais ricos em hidrogênio como adesivos, água, produtos de corrosão, materiais orgânicos em geral, ou seja, as informações contidas nas imagens obtidas em cada uma das técnicas se complementam entre si [9-15].

O objetivo do presente trabalho é demonstrar a viabilidade de utilização da técnica da tomografia com nêutrons em numismática, apresentando alguns resultados e imagens selecionadas, obtidas de duas moedas brasileiras compostas de diferentes ligas de Prata e Cobre, cunhadas nos séculos XIX e XX, irradiadas no equipamento para tomografia com nêutrons do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear de São Paulo (IPEN-CNEN/SP).

O equipamento para Tomografia com Nêutrons do IPEN-CNEN/SP

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático do equipamento para tomografia com nêutrons (TN) utilizado neste trabalho.

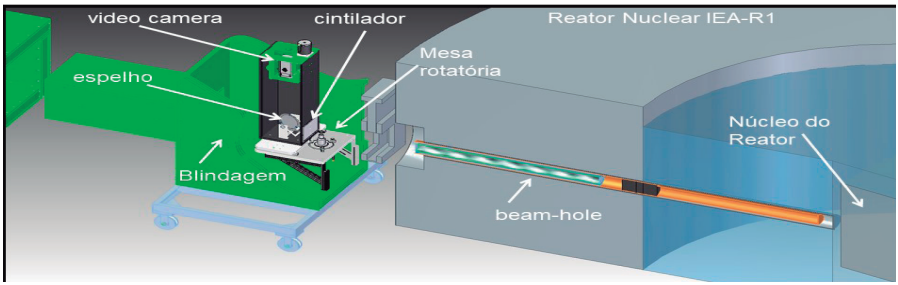


Figura. 1. Diagrama do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.

O conjunto do equipamento, destacado em verde, está instalado no canal de irradiação #14 do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1, e seus principais componentes são os seguintes: mesa rotatória, onde a amostra a ser estudada, é fixada para ser irradiada pelo feixe de nêutrons; tela cintiladora (Li^6F/ZNS - NE426), onde imagens bidimensionais (2D - radiografias) da estrutura interna da amostra são formadas; espelho plano, que reflete estas imagens em direção à uma câmera digital de vídeo (ANDOR Ikon - M), que as captura e as converte na forma de imagens digitais, as quais cada elemento que as compõe é chamado de pixel (Picture Element). Estas imagens são armazenadas em um computador (workstation - DELL Precision 5500) e digitalizadas em 16 bits, de forma que ao pixel mais escuro é atribuído o valor NC = 0 e ao mais claro o valor NC =65.536; uma interface

eletromecânica conecta a mesa e a câmera de vídeo de forma que, após uma imagem ser capturada, a mesa gira a amostra 0,9º, e outra imagem é capturada até completar 360º. Dessa forma, 400 imagens bidimensionais são capturadas e armazenadas. Além disso, são empregados dois softwares, instalados neste mesmo computador: *Octopus* 8.7, o qual, a partir das imagens capturadas, gera as tomografias nos três planos de visualização (XY, XZ, YZ), e *VG Studio Max* 2.2, que faz uso dos arquivos das tomografias para gerar imagens tridimensionais (3D) da estrutura interna da amostra investigada. Descrições detalhadas tanto do equipamento quanto do procedimento para obtenção da tomografia podem ser encontradas em [14,16,17]. Na posição de irradiação o feixe de nêutrons possui fluxo de $8{,}0\times10^{6}$n.s^{-1}cm^{-2} e diâmetro máximo de 16 cm. O tempo necessário para a obtenção da tomografia é de aproximadamente 400 s, e a resolução espacial máxima na imagem é 205±24 µm. A Figura 2 mostra em detalhe, uma moeda na posição de irradiação.

Materiais e Métodos

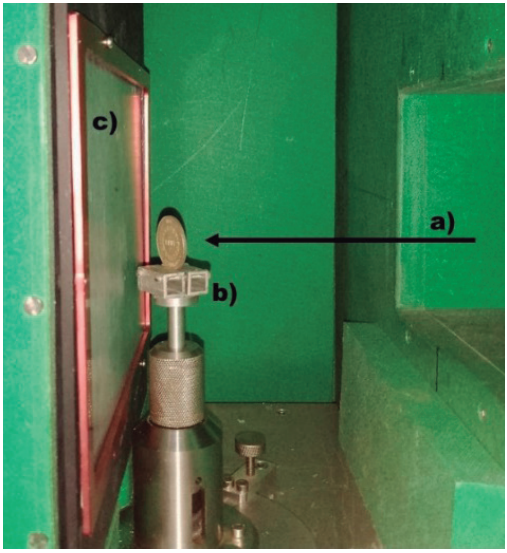


Figura 2: Moeda na posição de irradiação: a) feixe de nêutrons; b) mesa rotatória; c) tela cintiladora.

No presente trabalho, foram estudadas duas moedas brasileiras cunhadas em diferentes ligas de Prata e Cobre. A primeira de valor de face 1.000 réis, do 2º Tipo do 3º Sistema Monetário do Império do Brasil cunhada em 1866[1] e, a segunda de 2.000 réis, cunhada em 1929[2]. Algumas de suas características: diâmetros (∅), massas (M) e composições, descritas na Tabela 1, foram obtidas do catálogo numismático [18]. Na Figura 3 são mostradas fotografias do anverso e do reverso de ambas as moedas estudadas.

[1]Decreto nº 2.537 - de 2 de março de 1860, Capítulo XIII, Art. 63 a 66.
[2]Decreto nº 16.409, de 12 de março de 1924.

Tabela 1: Características das moedas estudadas [18].

Cunhagem	∅ (mm)	**M** (g)	**Composição** (%)
1866	30	12,75	Ag-91,7; Cu-8,3
1929	26	8,00	Ag-50; Cu-50

Figura 3: Anverso (3a e 3c) e reverso (3b e 3d) das moedas cunhadas em 1866 e 1929 respectivamente. acervo particular do autor



Resultados

Tomografias e imagens 3D

As Figuras 4 e 5 mostram tomografias do anverso e reverso de cada uma das moedas, obtidas no plano de visualização YZ. Cada tomografia corresponde à uma espessura de 0,28mm de cada moeda. Exceto por um único dano (vazio), visível também à olho nu, na parte superior do reverso da moeda de 1866 (Fig. 3b), as tomografias não revelaram quaisquer outras ocorrências como trincas e bolhas até o limite de visualização do equipamento, cuja resolução espacial é da ordem de 205±24 µm. Este dano está evidenciado e dimensionado na imagem 3D da Figura 6, onde: **(a)** é a distância da borda do dano a partir do anverso; **(b)** é sua profundidade; **(c)** é sua largura maior.

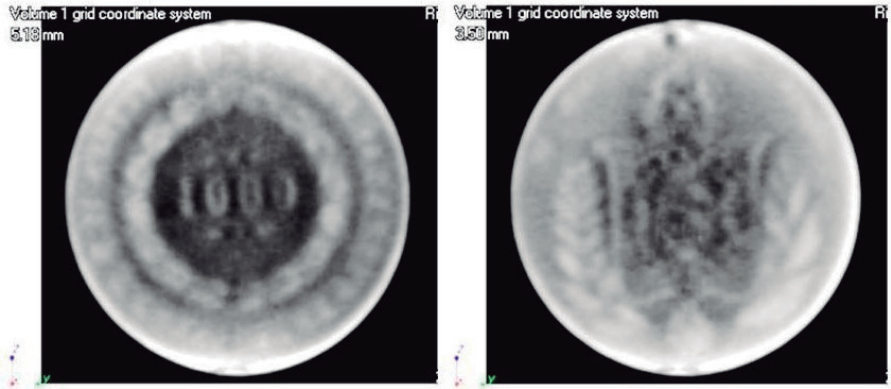


Figura 4: Tomografias no plano de visualização YZ do anverso e reverso da moeda de 1866

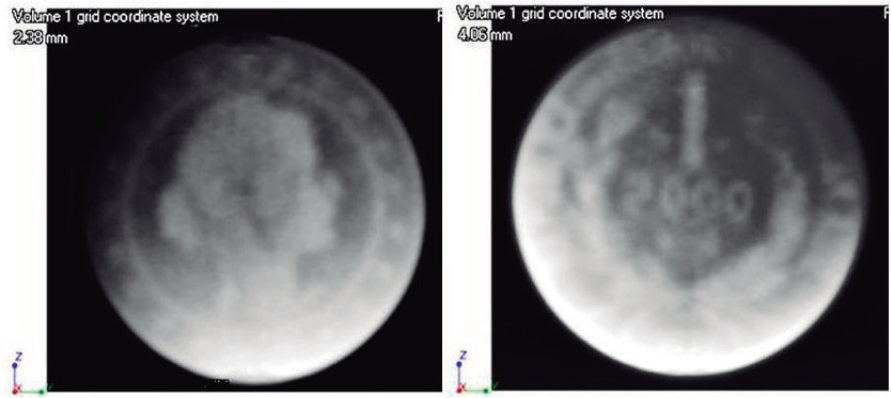


Figura 5: Tomografias no plano de visualização YZ do anverso e reverso da moeda de 1929.

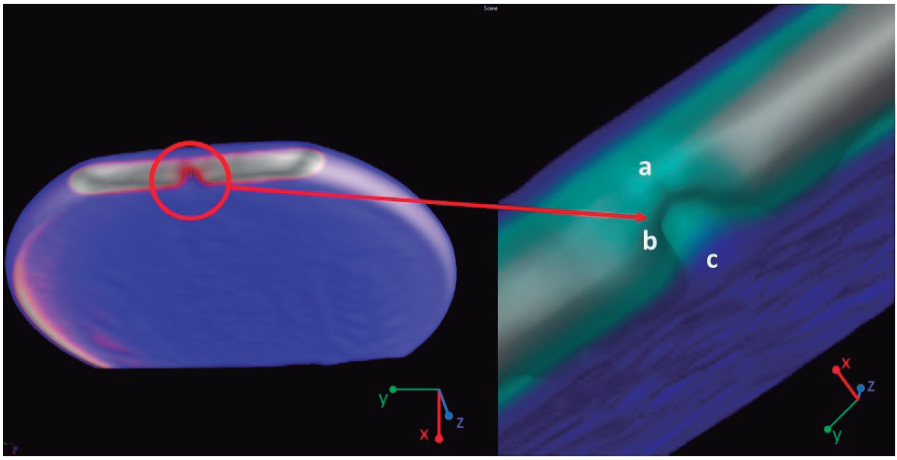


Figura 6: Imagem 3D da moeda de 1866 realçando o dano: a) 1,25 mm; b) 0,96 mm; c) 0,86 mm.

As Figuras 7 (a) e 8 (a) mostram as fotografias dos anversos das moedas cunhadas em 1866 e 1929, nas quais estão indicadas duas posições onde foram feitas medidas de espessura nas respectivas imagens 3D, apresentadas nas Figuras 7 (b) e 8 (b). Os resultados obtidos foram:

a) moeda de 1866: posição (1) 1,98 ± 0,2 mm; posição (2) 2,21 ± 0,2 mm.

b) moeda de 1929: posição (1) 1,69 ± 0,2 mm; posição (2) 1,87 ± 0,2 mm.

As medidas feitas nas posições 2, em ambas as moedas, são ligeiramente maiores do que as das posições 1 devido ao aumento da espessura causado pelo alto relevo localizado, resultante do processo de cunhagem.

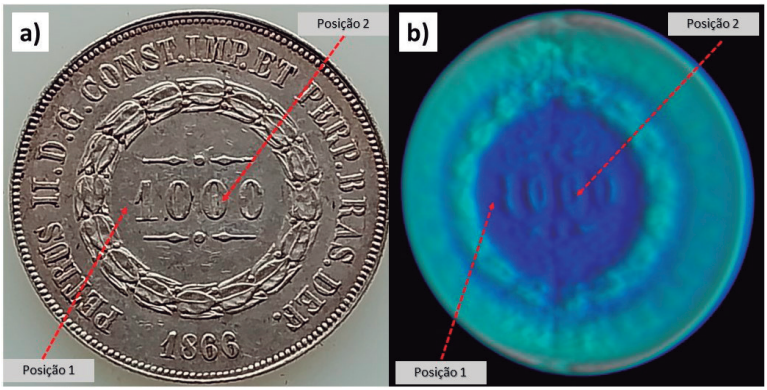


Figura 7: Fotografia e imagem 3D mostrando as posições onde foram feitas as medidas de espessura na moeda de 1866.

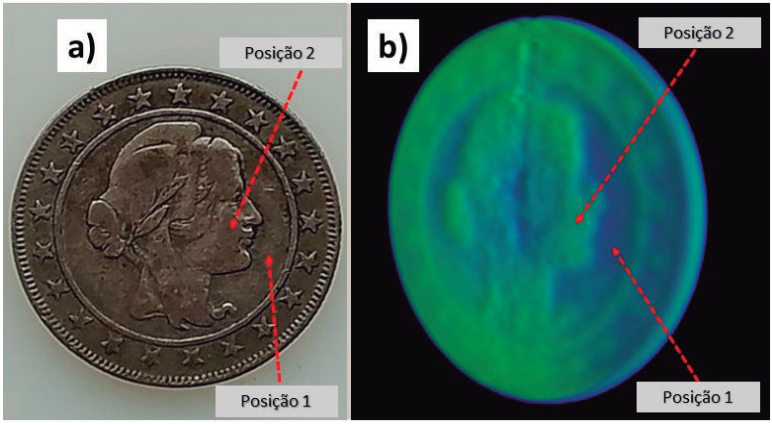


Figura 8: Fotografia e imagem 3D mostrando as posições onde foram feitas as medidas de espessura na moeda de 1929.

A unidade básica que compõe uma imagem tomográfica (3D) é chamado de voxel (Volume Element), e das imagens tridimensionais obtidas, é possível determinar diretamente os volumes (V) das moedas e, consequentemente, suas densidades médias (D) com suas respectivas incertezas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores determinados para os volumes e densidades médias das moedas estudadas.

Cunhagem	**V** (cm^3)	**D** (g/cm^3)
1866	1,40 ± 0,04	9,0 ± 0,1
1929	0,95 ± 0,03	8,4 ± 0,1

Coeficiente de atenuação linear

Teoricamente um feixe de nêutrons ao atravessar uma amostra, sofrerá uma atenuação exponencial em sua intensidade dada por [19]:

$$I(x) = Io.e^{-\Sigma x} \qquad (1)$$

sendo "I(x)" a intensidade do feixe de nêutrons que atravessou uma espessura "x(cm)" da amostra, sem sofrer interação; "Io" a intensidade do feixe de nêutrons incidente nesta amostra; "Σ" o coeficiente de atenuação linear (cm^{-1}) da amostra.

Como mencionado anteriormente, o coeficiente de atenuação linear pode ser determinado ou por meio das radiografias ou das tomografias obtidas. No presente trabalho foi determinado **a** partir das radiografias, e os resultados apresentados são valores médios obtidos ao longo dos diâmetros das moedas. Além disto, foi também determinado o valor do coeficiente de atenuação para uma amostra padrão de prata 900, a qual foi selecionada para comparação, pois ambas as moedas possuem prata em suas ligas [18]. Como esperado, o valor mais elevado obtido foi para a amostra padrão de prata, e os outros dois valores determinados são proporcionais aos teores de prata em suas ligas metálicas, ou seja, 91,75% para a moeda de 1866 e 50% para a moeda de 1929 (vide Tabela 1) [18].

Tabela 3: Valores dos coeficientes de atenuação lineares obtidos.

Amostra	S(cm^{-1})
Padrão de prata 900	5,5 ± 0,9
Moeda cunhada em 1866, teor de prata 91,7%	4,3 ± 0,4
Moeda cunhada em 1929, teor de prata 50%	2,7 ± 0,3

Radiação induzida no processo da tomografia com nêutrons.

Este estudo foi realizado devido ao fato que no procedimento para a obtenção da tomografia, as amostras são irradiadas em um intenso feixe de nêutrons, de modo que é esperada a ativação radioativa de alguns de seus elementos químicos. Para determinar a intensidade e o período, após a irradiação, para o qual a radioatividade induzida torna-se desprezível em termos de proteção radiológica, as amostras foram irradiadas individualmente por 400s, o mesmo tempo necessário para a obtenção da tomografia. Em seguida, foram analisadas em um sistema de contagem Ludlum (mod. 2929) de alta sensibilidade, capaz de detectar radiações alfa, beta e gama. O resultado obtido mostrou que em aproximadamente 30 h após o término da irradiação, o nível da atividade radioativa induzida nas moedas torna-se insignificante, atingindo o nível inicial de antes da irradiação. Esta informação é importante no caso de ser uma amostra de interesse arqueológico e do patrimônio histórico e cultural, que será devolvida aos respectivos curadores [20-22].

Conclusões

A técnica da tomografia com nêutrons foi empregada como um método não destrutivo e não invasivo no estudo de duas moedas brasileiras de prata dos séculos XIX e XX. Dos resultados obtidos as seguintes conclusões podem ser explanadas:

1 – A técnica fornece meios de se estudar a estrutura interna das moedas, na busca de possíveis trincas e bolhas causadas ou no processo de cunhagem ou por ação do tempo.

2 – Foi possível por meio das imagens tomográficas e 3D mensurar

espessuras, volumes e densidades das moedas, com suas respectivas incertezas.

3 - Foi possível constatar por meio dos valores dos coeficientes de atenuação linear, que as moedas possuem diferentes teores de prata na composição de suas ligas, desta forma, a técnica é viável para ser utilizada no intuito de auxiliar estudos de autenticidade.

4- A radioatividade induzida pelos nêutrons durante a irradiação das moedas para a obtenção das tomografias, torna-se desprezível após ~30 h do término da irradiação, demonstrando ser uma técnica não destrutiva.

5 - A possibilidade de poder inspecionar amostras com dimensões de até ~100 cm^2, em cerca de 7 minutos, torna essa técnica atrativa para este campo de estudos

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade tanto da técnica da tomografia com nêutrons como do equipamento do IPEN-CNEN/SP no estudo da numismática, podendo ser empregada no apoio à especialistas do campo de preservação e restauração destes e de outros objetos do patrimônio histórico e cultural.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -CAPES-, pelo apoio financeiro a este projeto por meio do Programa de Bolsas de Pós Doutorado através do Processo nº 88887.362949/2019-00.

Referências bibliográficas

[1] DI FAZIO, M., FELICI, A.C., CATALLI, F., DE VITO, C. TRANQUILLUS, G. S. (2019). **Microstructure and chemical composition of Roman orichalcum coins emitted after the monetary reform of Augustus (23 B.C.).** Scientific Reports. 9:12668 | https://doi.org/10.1038/s41598-019-48941-4.

[2] GENTELLI, L. (2017). **Analysis of 16th to 19th Century Silver Coins**. Tese apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Filosofia pela University of Western Australia.

[3] GRIESSER, M., TRAUM, R., VONDROVEC, K., VONTOBEL, P., LEHMANN, E.H. (2012). **Application of X-Ray and Neutron Tomography to Study Antique Greek Bronze Coins with a High Lead Content**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 37 https://doi:10.1088/1757-899X/37/1/012011 .

[4] SEARS, V. F. (2006). **Neutron scattering lengths and cross sections.** Neutron News 3:1,26–37.

[5] SZILÁGYI, V., KIS, Z., SZENTMIKLÓSI, L. (2016). **Neutron Imaging for Archaeometry**. Archeometriai Műhely 2016/XIII./3.

[6] STANOJEV PEREIRA, M.A., MARQUES, J.G., SANTOS, J.P., BURBIDGE, C.I., DIAS, M.I., PRUDÊNCIO, M.I. (2013): **Neutron imaging techniques applied to studies in the archaeological and cultural heritage fields**. Mediterranean Archaeology and Archaeometry 13 137–143.

[7] ABRAHAM, E., BESSOU, M., ZIÉGLÉ, A., HERVÉ, M. C., SZENTMIKLÓSI, L., KASZTOVSZKY, ZS., KIS, Z., MENU, M. (2014): **Terahertz, X-ray and neutron computed tomography of an Eighteenth Dynasty Egyptian sealed pottery**. Applied Physics, A 117, 963–972.

[8] AGRESTI, J., OSTICIOLI, I., GUIDOTTI, M.C., KARDJILOV, N., & SIANO, S. (2016): **Non-invasive archaeometallurgical approach to the investigations of bronze figurines using neutron, laser, and X-ray techniques**. Microchemical Journal 124 765–774.

[9] MANNES, D., JOSIC, L., LEHMANN, E., NIEMZ, P. (2009). **Neutron attenuation coefficients for non-invasive quantification of wood properties**. Holzforschung, 63(4), 472-478. https://doi.org/10.1515/HF.2009.081

[10] DE BEER, F. C. (2015). **Neutron and X-ray radiography/tomography: non-destructive analytical tools for the characterization of nuclear materials**. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(10), 913-924. http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n10a3.

[11] KAESTNER, A., HASSANEIN, R., VONTOBEL, P., LEHMANN, P., SCHAAP, J., LEHMANN, E., FLÜHLER, H. (2007). **Mapping the 3D water dynamics in heterogeneous sands using thermal neutrons.** Chemical Engineering Journal, 130(2-3), 79-85. https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.06.013.

[12] PUGLIESI, R.; GERALDO, L.P.; ANDRADE, M.L.G.; MENESES, M.O.; PEREIRA, M.A.S.; MAIZATO, M.S. (1999). **Inspection of an Artificial Heart by the Neutron Radiography Technique**. Nucl. Instrum. Meth. A424, 1, 248 – 251.

[13] PRUDÊNCIO, M. I.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; MARQUES, J.G.; DIAS, M.I.; ESTEVES, L.; BURBIDGE, C. I.; TRINDADE, M.J.; ALBUQUERQUE, M.B.(2012). **Neutron tomography for the assessment of consolidant impregnation efficiency in Portuguese glazed tiles (16th and 18th centuries)**, J. Arch. Science. 39, pp.964-969.

[14] STANOJEV PEREIRA, M.A.; SCHOUERI, R.; DOMIENIKAN, C.; TOLEDO, F.; ANDRADE, M.L.G.; PUGLIESI, R. (2013). **The neutron tomography facility of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate ceramic objects from the Brazilian cultural heritage**. Applied Radiation and Isotopes, 75, pp.6-10.

[15] FIGUEIREDO, E. STANOJEV PEREIRA, M. A., LOPES, F., MARQUES, J. G., SANTOS, J. P., ARAÚJO, M. F., SILVA, R. J.C., SENNA-MARTINEZ, J. C. (2016). **Investigating Early/Middle Bronze Age copper and bronze axes by micro X-ray fluorescence spectrometry and neutron imaging techniques**. Spectrochimica Acta Part B 122: 15–22.

[16] SCHOUERI, R.; DOMIENIKAN, C.; TOLEDO, F.; ANDRADE, M.L.G.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.(2014).**The new facility for neutron tomography of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate hydrogenous substances**. Applied Radiation and Isotopes, 84, 02: 22-26.

[17] STANOJEV PEREIRA, M.A. (2017) **Imageamento com Nêutrons: 30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP**. Sagitarius Ed. SãoPaulo. ISBN 978-85-923404-1-4. Disponível online em: https://www.ipen.br/biblioteca/slr/cel/1062.

[18] CAFFARELLI, E. V. (2002). **As Moedas do Brasil – Desde o Reino Unido 1818-2000**. 2nd Edição,. Edição do Autor. São Paulo, SP.

[19] KOBAYASHY, H.; WAKAO, H.; IKEDA, Y.; OHOKUBO, K.; TSURUNO, A. (1992) **Macroscopic Cross Section Measurements and Defect Detection in Materials Using Neutron Radiography Technique**. Journal of Nuclear Science and Technology, 29 (11), p 1045-1053.

[20] STANOJEV PEREIRA. M. A; PUGLIESI, R. (2018). **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.

[21] STANOJEV PEREIRA, M. A., PUGLIESI R., ANDRADE M. L., PRUDÊNCIO, M. I. (2017). **Penetração e distribuição do consolidante Paraloid® B-72 em cerâmica branca estudada por tomografia com nêutrons**. Quím. Nova, São Paulo, v. 40, n. 7, p. 781-784.

[22] PUGLIESI R., STANOJEV PEREIRA M. A., ANDRADE M. L. (2020). **Concentration and distribution of oil in the reservoir mineral Dolomite studied by neutron tomography**. Brazilian J.of Rad. Sciences.v. 8, n. 02,p. 01-12.