

Parámetros efectivos y dispersión de la neutrografía en el reactor RP-10: Estudio preliminar

Alcides López*, Santiago Ticona

Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. José Saco
km 12.5, Carabayllo, Lima

Resumen

Se presenta un avance del estudio de los parámetros efectivos, alternativos a las normas, más importantes del sistema de adquisición de neutrografías, que considera una fuente puntual de irradiación y una distancia efectiva de registro, así como del efecto dispersivo que diversos tipos de materiales producen cuando los neutrones libres inciden sobre ellos, observándose que no solo dependen de la forma y la distancia del objeto a la pantalla fotográfica o la divergencia del haz neutrónico, sino también de la constitución de estos materiales. Se puede apreciar que los materiales hidrogenados y sólidos micro y nanoestructurados son capaces de dispersar notablemente los neutrones. El estudio se desarrolla por medio del análisis de imágenes obtenidas por neutrografía usando el haz de neutrones del reactor nuclear RP-10, las aplicaciones del falso color a la intensidad del flujo neutrónico que nos da un contraste cromático y la simulación de imágenes 3D de las intensidades han ayudado a reforzar e interpretar la información obtenida.

Palabras Clave: Radiografía neutrónica, Herencia cultural, Divergencia de haz neutrónico, Longitud de cámara neutrónica

Effective Parameters and neutrography dispersion in the RP-10 reactor: Preliminary study

Abstract

This paper presents a breakthrough in the study of the most important effective parameters, alternative to the standards, of the neutrography acquisition system, considering an irradiation point source and an effective register distance, as well as the dispersive effect that some kind of materials can produce when free neutrons impact them. It was observed that they do not only depend on the shape and distance from the object to the photographic screen or the neutron beam divergence, but also on the constitution of these materials. Hydrogenated materials as well as micro and nano structured solids are capable to produce significant neutron scattering. The study is developed through the analysis of images obtained by neutrography using the neutron beam of the RP-10 nuclear reactor. False color applications to the intensity of the neutron flux which gives a color contrast and simulation of 3D images intensities have helped to interpret the obtained information.

Keywords: Neutron Radiography, Culture heritage, Neutron bean divergence, Neutronic Length camera

1. Introducción

El neutrón es un nucleón estable cuando se encuentra formando parte del núcleo atómico, si se encuentra libre tiene una vida media de 15 min, no tiene carga eléctrica efectiva, su masa es 1.0087 uma y su spin $\frac{1}{2}$, estas propiedades lo hacen altamente efectivo para gran parte de pruebas relacionadas con el estado sólido, donde una de las aplicaciones de los neutrones es la neutrografía o radiografía neutrónica, la cual nos permite registrar la imagen fotográfica o de video de la radiación neutrónica atravesando estructuras sólidas. Los neutrones,

contrariamente a los rayos X o a los rayos gamma, son atenuados fuertemente por algunos elementos ligeros como el hidrógeno, cadmio y boro por lo que su presencia puede ser fácilmente detectada [1], entre las aplicaciones típicas de la radiografía neutrónica podemos mencionar al análisis de combustibles nucleares, detección de materiales hidrogenados, detección de fallas en álabes de turbinas a gas, alas de aviones y palas de helicópteros [2], corrosión en componentes de aeronaves, control de calidad de materiales cerámicos, detección de

* Correspondencia autor: alcideslambda@yahoo.com

materiales explosivos y drogas, detección de películas lubricantes en sistemas de rodamiento, procesos dinámicos de lubricación, refrigeración y combustión así como los estudios arqueométricos de la herencia cultural [3,4].

Los neutrones producen también gran contraste entre materiales de similares densidades, por lo que hace que la técnica neutrográfica sea complementaria a las radiografías tanto de rayos X como gamma. En la actualidad, con el fin de mejorar la interpretación neutrográfica se están usando las imágenes en falso color y las reconstrucciones tanto estereoscópicas como simulaciones tridimensionales [5,6] que junto al contraste cromático que proporciona el falso color enriquecen la información utilizable. Su alta penetración para materiales densos y su alta sensibilidad a los elementos químicos ligeros hacen de la neutrografía una herramienta útil tanto en la ciencia como la ingeniería de los materiales y sus variadas aplicaciones. El desarrollo de la óptica de neutrones y las técnicas neutrográficas están permitiendo en la actualidad hacer diseños y prácticas de microscopía con neutrones [6-7].

El objetivo del presente estudio es mostrar y analizar los parámetros efectivos más relevantes y la dispersión del sistema de adquisición de neutrografías en el reactor nuclear RP-10. Alternativamente a los parámetros L/D de la neutrografía convencional que usa L y D medidos directamente [8], desde el punto de vista óptico geométrico es más conveniente medir el semiángulo efectivo de divergencia del haz neutrónico fuera de la pared del reactor nuclear y la longitud de cámara consistente en la distancia equivalente entre la fuente de neutrones considerada casi puntual y la pantalla de adquisición de imágenes, estos parámetros efectivos tienen la ventaja de simplificar cálculos y permitir modificar la longitud de cámara como si el haz de neutrones se tratara de un cono de radiación.

2. Parte experimental

2.1 Cálculo de la divergencia efectiva del haz neutrónico

Alternativamente a los parámetros usados en la neutrografía convencional, consideramos que los parámetros importantes para toda

neutrografía son: i) el semiángulo α de divergencia efectiva del haz de neutrones y ii) la distancia Λ entre la fuente considerada puntual de neutrones y la placa fotográfica de registro, longitud al que llamamos “longitud de cámara Λ ” la que corresponde a la longitud efectiva entre una fuente puntual que emite un haz divergente con un semiángulo efectivo α .

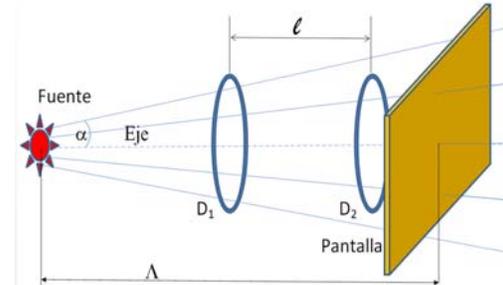


Figura 1. Esquema del sistema neutrográfico experimental, la fuente es el reactor RP-10.

En la presente investigación hacemos uso de dos anillos de hierro de diámetros externos $D_1 = D_2 = 134$ mm, separados una distancia $l = 440$ mm, la distancia entre el aro D_2 y la pantalla es de 50 mm, esta disposición mostrada en la Figura 1 nos permite obtener experimentalmente la neutrografía de la Figura 2, en la cual podemos medir los radios externos de la proyección de los dos anillos sobre la placa fotográfica.

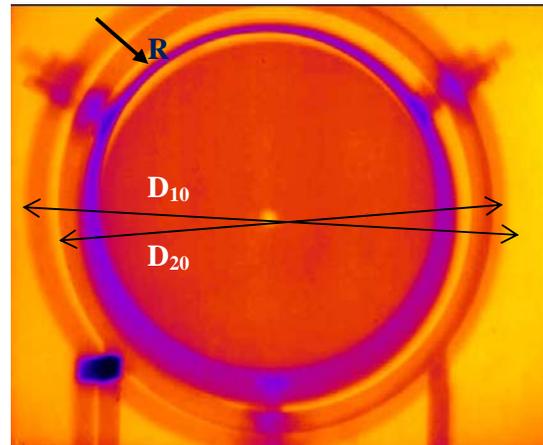


Figura 2. Neutrografía positiva en falso color mostrando la proyección de los aros del esquema de la Figura 1.

En la Figura 2 medimos los diámetros externos correspondientes a $D_{10} = 159$ mm y $D_{20} = 136$ mm con los cuales calculamos el semiángulo de divergencia α y la longitud de cámara Λ mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{(D_{10} - 134 \text{ mm}) / 2}{\ell + 50 \text{ mm}} \right) \dots (1)$$

$$\alpha = \arctg \left(\frac{(D_{20} - 134 \text{ mm}) / 2}{50 \text{ mm}} \right) \dots (2)$$

$$\alpha = \arctg \left(\frac{D_{10} / 2}{\Lambda} \right) \dots (3)$$

Reemplazando los datos experimentales en las ecuaciones 1 y 2 obtenemos:

$$\alpha = 1,46^\circ$$

y de la ecuación 3 se obtiene:

$$\Lambda = 3119 \text{ mm}$$

2.2 Dispersión neutrónica en varillas de fierro cubiertas con pintura

En la parte superior de la Figura 2 se muestra una flecha con etiqueta R, a lo largo de la cual se ha medido el perfil de intensidades, la cual es mostrada en la Figura 3, en esta imagen también se muestran dos cuadrados con fondo azul para indicar proporcionalmente (6 mm de lado) la sección recta de las varillas de fierro con las que fueron hechos los anillos D_1 y D_2 de la Figura 1, teniendo en cuenta que el anillo indicado con D_{10} se encuentra a 490 mm de distancia de la placa fotográfica y el D_{20} se encuentra a 50 mm, en este caso podemos observar en las Figuras 2 y 3 que el fierro que se encuentra más lejos dispersa más que la que se encuentra más cerca, en este caso la dispersión se corrobora porque el flujo neutrónico transmitido también disminuye, tal como se observa en la ligera disminución de la intensidad del perfil correspondiente, en este caso la dispersión neutrónica está dominada por la distancia y por la divergencia y consiguiente disminución del flujo del haz neutrónico.

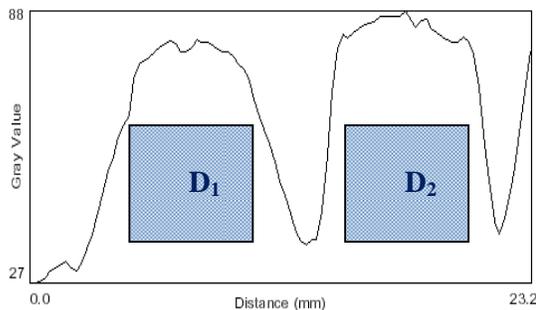


Figura 3. Perfil de intensidades a lo largo de la flecha R de la Figura 2.

2.3 Dispersión neutrónica en sustancias hidrogenadas

Para esta experiencia se han irradiado una pata fresca de pollo y vasos de plomo y

aluminio conteniendo aceite, las distancias de los objetos a la placa fotográfica han sido nulas en ambos casos.

En la Figura 4 se muestra el par neutrográfico de una pata de pollo fresco, en la neutrografía se puede apreciar el incremento de la intensidad del haz neutrónico en la parte interdigital del segundo y tercer dedo, causado por la dispersión de la parte de la pata más abundante en colágeno y apreciándose menos intenso en el dedo mayor y a la altura de la canilla, sectores con menor cantidad de colágeno y agua, evidenciando la menor dispersión y mayor absorción de neutrones.

En la Figura 5 se muestra una serie de neutrografías en las que se han utilizado un vaso de aluminio y otro de plomo ambos de 50 mm de diámetro, 42 mm de altura, base de 8 mm y paredes de 2 mm, en los cuales se les ha llenado aproximadamente las tres cuartas partes con aceite de motor, en a) se muestra la neutrografía negativa del vaso de plomo vacío, en b) se muestra el esquema de la ubicación del aceite en los vasos, c) y d) son neutrografías positivas en falso color de vasos de aluminio y plomo respectivamente, ambos conteniendo aceite.



Figura 4. Par neutrográfico positivo en falso color de una pata de pollo fresco.

En las Figuras 5c y 5d se aprecia, en la zona correspondiente al aire, un incremento del flujo que debe provenir de la fuerte dispersión neutrónica producida por el aceite, observamos que dicha dispersión no guarda simetría con la parte baja donde se encuentran las bases gruesas tanto de aluminio

como de plomo. La Figura 6 nos muestra los perfiles de intensidades de la neutrografía 5c a los niveles indicados, siendo el nivel 3 el de mayor concentración, lo que nos hace concluir que la dispersión ocurre con mayor intensidad en materiales orgánicos como el aceite, pero tiene preferencias por los medios con menor índice de refracción neutrónica como el aire, lo cual nos sugiere un camino óptico para los neutrones de la forma como se muestra en la Figura 7, suponemos que la dispersión es similar en todas las direcciones próximas a la trayectoria de incidencia, pero los predominantes, que corresponden al plano meridional, son los que han sido graficados en esta oportunidad.

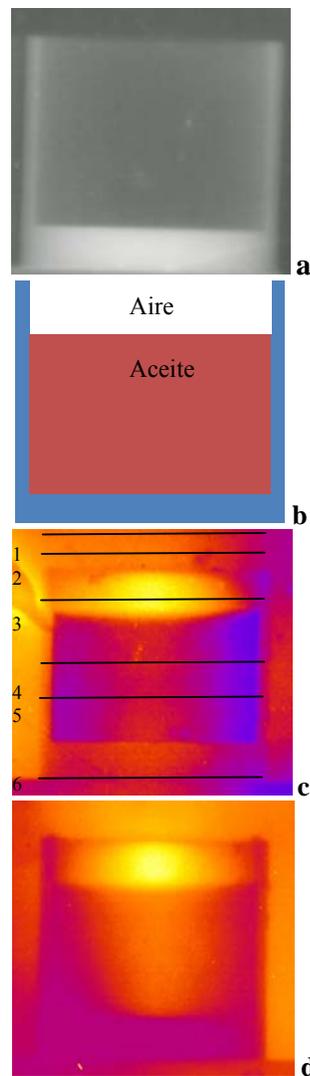


Figura 5. Serie neutrográfica de: a) Vaso de plomo vacío, b) Esquema del contenido de aceite, c) Vaso de aluminio conteniendo aceite indicando diferentes niveles, d) Vaso de plomo conteniendo aceite.

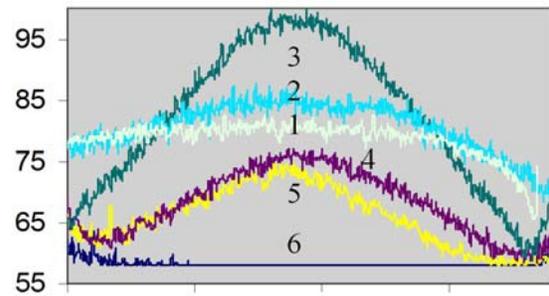


Figura 6. Flujo de neutrones localizados a lo largo de cada nivel de la Figura 5c.

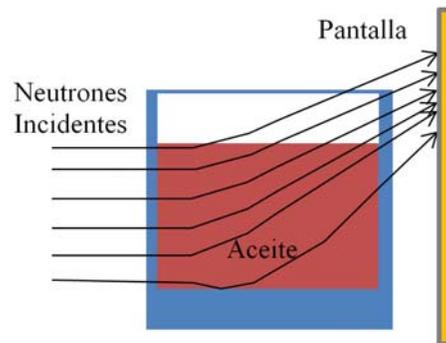


Figura 7. Esquema deducido de la trayectoria mayoritaria de los neutrones dispersados en el aceite.

2.4 Dispersión neutrónica en sólidos cerámicos

Se ha experimentado la dispersión de los neutrones en sólidos cerámicos, con las muestras a muy corta distancia de la placa fotográfica encontrándose resultados interesantes en dos tipos de vasijas de modelos ancestrales, pero de confección artesanal con técnicas y materiales modernos; en el primer caso, tenemos el par neutrográfico de la Figura 8 en positivo y en falso color de una vasija antropomorfa de 23 cm de altura, mostrando una buena resolución debida principalmente a que este tipo de arcilla y de esmaltado producen poca dispersión de los neutrones, observando con detenimiento se puede apreciar que las paredes internas son más definidas debido a que se nota un material impregnado aparentemente con la finalidad de disminuir la filtración del agua.

La segunda muestra cerámica corresponde a una vasija en forma de retrato, cocida, sin esmaltado, moderna y de 25 cm de altura, que ha sido neutrografiada en positivo y en falso color, tal como se muestra en la Figura 9, en donde se observa como principal característica la baja resolución de la imagen

a pesar de que las paredes son de menor espesor que la vasija anterior, en este caso, la dispersión puede estar dominada por la micro o nanoestructuración del material, tal como se muestran en estudios de SAXS y SANS [9].

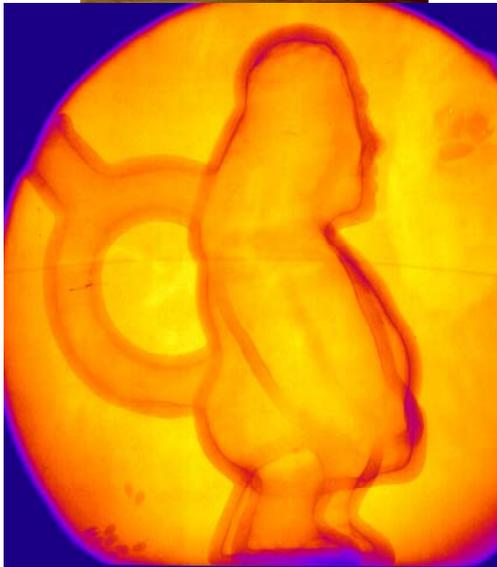


Figura 8. Par neutrográfico (en positivo y en falso color) de un cerámico antropomorfo moderno de 23 cm de altura.

2.5 Dispersión neutrónica en el zafiro

Se ha neutrografiado lateralmente un cilindro circular de safiro de 10 cm de diámetro y 10 cm de altura, el mismo que se muestra en la Figura 10. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 11 que han sido obtenidos en falso color (11a) haciéndose las reconstrucciones tridimensionales tanto de las neutrografías en positivo (11b) como en negativo (11c), en la neutrografía en positivo se observa una dispersión mayoritaria por el

lado derecho del cilindro debido a la inhomogeneidad del haz neutrónico, estas reconstrucciones y el uso del falso color que nos aporta un contraste cromático extra, solo son de ayuda para una mejor interpretación.

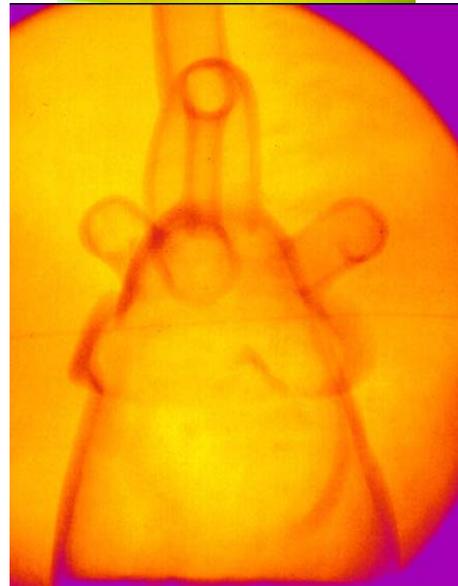


Figura 9. Par neutrográfico (en positivo y en falso color) de un cerámico retrato moderno de 25 cm de altura.

de los resultados, pudiendo aplicarse a objetos cada vez más complejos.



Figura 10. Cilindro de zafiro de 10 cm de diámetro y 10 cm de altura.

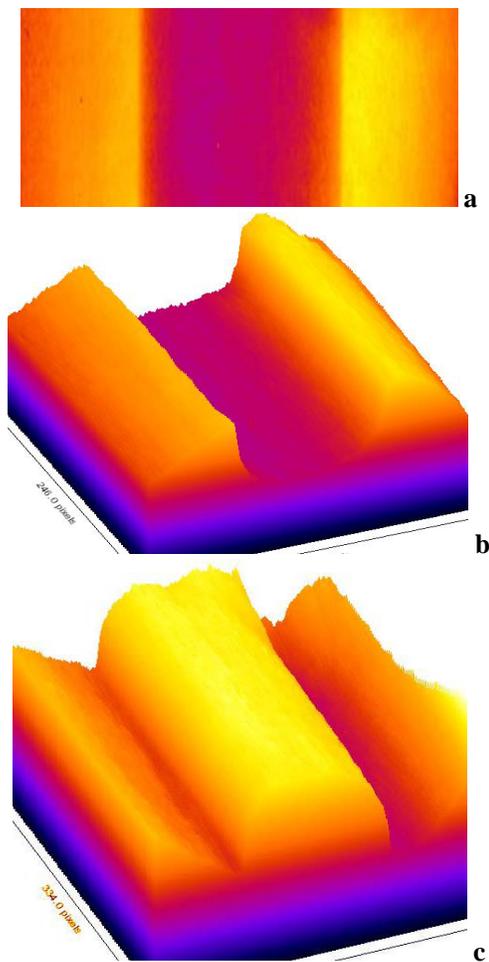


Figura 11. Neutrografía de un cilindro de zafiro en falso color, a) Neutrografía directa en positivo, b) Simulación 3D positiva, c) Simulación 3D negativa.

3. Conclusiones y Discusiones

Se ha podido cuantificar algunos parámetros efectivos ópticamente importantes del sistema de adquisición de neutrografías realizadas en el reactor RP-10, habiéndose obtenido $\alpha=1,46^\circ$ el semiángulo efectivo de divergencia del haz neutrónico y se ha calculado la longitud de cámara $\Lambda=3119$ mm, longitud equivalente que corresponde a la distancia entre una supuesta fuente puntual de neutrones y la placa fotográfica registradora, suposición que concuerda con los resultados experimentales y hace más sencillo los cálculos geométricos y la modificación de la longitud de cámara.

De los diversos materiales analizados se ha encontrado buena compatibilidad con la geometría de fuente puntual radiante y que no solo la geometría de la muestra o la distancia contribuyen con la dispersión de los neutrones, sino también la constitución o tipo de material irradiado, lo último se ha podido comprobar tanto con materiales hidrogenados como cerámicos, dicha dispersión, disminuye la resolución de las neutrografías en forma adicional a la producido por efecto de la divergencia del haz neutrónico.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen la valiosa ayuda de los operadores del reactor RP-10 los Ing. Roberto Giol, Rolando Arrieta, Alberto Salazar, Agustín Urcia, Emilio Veramendi; a los oficiales de protección radiológica el Lic. Mariano Vela, Ing. Fernando Ramos y Alejandro Zapata y a los técnicos mecánicos Luis Huatay, Marco Polo y Yuri Hernández.

5. Referencias

- [1]. Lehmann EH, Peetermans S, *et al.* Energy-selective neutron imaging with high spatial resolution and its impact on the study of crystalline-structured materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A; 2014; 735: 102-109.
- [2]. Balaskó M, Veres I, *et al.* Composite structure of helicopter rotor blades studied by neutron- and X-ray radiography. Physica B Condensed Matter. 2004; 350(1-3): 107-109.
- [3]. Masalles A, Lehmann E, Mannes D. Non-destructive Investigation of “The Violinist” a Lead Sculpture by Pablo Gargallo, Using the Neutron Imaging Facility

- NEUTRA in the Paul Scherrer Institute. *Physics Procedia*. 2015; 69: 636-645.
- [4]. Mongy T. Application of neutron tomography in culture heritage research. *Applied Radiation and Isotopes*. 2014; 85: 54-59.
- [5]. Adb el Bar W, Mahmoud I, Konber H, Mongy T. Image reconstruction technique using projection data from neutron tomography system. *Alexandria Engineering Journal*. 2015; 54(4): 1057-1066.
- [6]. Silvani MI, Almeida GL, *et al.* Stereoscopic radiographic images with thermal neutrons. *Nuclear Instruments and methods in Physics Research Section A*. 2011; 652(1): 634-637.
- [7]. Cremer Jr. JT. *Neutron and X-ray Optics*. 1st edition. Amsterdam: Elsevier Inc.; 2013.
- [8]. American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM E-1026-04. Standard test method for determining the L/D ratio of neutron radiography beams. Pennsylvania, United States; 2013.
- [9]. Hermes HE, Frielinghaus H, *et al.* Quantitative analysis of small angle neutron scattering data from montmorillonite dispersions. *Polymer*. 2006; 47(6): 2147-2155.