

Inspecciones no destructivas mediante haces de neutrones

F.J. Bermejo, F. Fernández-Alonso, F. Sordo,
A. Rivera y J.M. Perlado

Las técnicas experimentales basadas en neutrones tales como neutronografía, difracción de neutrones o análisis de composición están bien establecidas. Presentan importantes ventajas para el análisis no destructivo de materiales, lo que las posiciona como buenas opciones para procesos de calidad en líneas de producción, con un alto grado de complementariedad con otras técnicas no destructivas, en particular, con el análisis de rayos X. Existen ejemplos de uso industrial para estudio de tuberías, hormigón o componentes de la industria aeronáutica. Sin embargo, su uso no está ampliamente extendido principalmente por el alto coste de instalación de una fuente de neutrones apropiada. En este artículo se discute la posibilidad, ya probada, de usar fuentes compactas de neutrones basadas en aceleradores de protones, cuyo coste de instalación se estima en varios millones de euros. Aun contando con intensidades de neutrones bajas con respecto a fuentes de espalación u otras basadas en reactores de fisión, las fuentes compactas resultan de utilidad para un buen número de aplicaciones industriales.

Neutron-based experimental techniques such as neutronography, diffraction, or compositional and elemental analysis are well established. They have important advantages in the non-destructive analysis of materials, making them a suitable option for quality-control protocols in industrial production lines. In addition, they are highly complementary to other non-destructive techniques, particularly X-ray analysis. Examples of industrial use include studies of pipes and ducts, concrete, or aeronautical components. Notwithstanding the above, the high cost associated with the construction and operation of the requisite neutron facilities has been an important limiting factor for their widespread use by the industrial sector. In this brief contribution, we explore the emerging (and already demonstrated) possibility of using compact, proton-accelerator-based neutron sources. These novel sources can be built and ran at a cost as low as a few M€, making them a competitive option to the more intense spallation or fission-based facilities for industrial applications.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de inspección no destructiva son una herramienta clave en los procesos de control de calidad y juegan un papel fundamental en los criterios de seguridad de las instalaciones nucleares tanto actuales como futuras. Debido a ello, el desarrollo de nuevas técnicas de inspección es clave para mejorar el nivel de calidad de los productos fabricados y puede suponer una ventaja significativa en un mercado cada día más competitivo. Tales técnicas complementan aquellas de tipo destructivo o semidestructivo, basadas en la remoción de parte del material para liberar las tensiones, seguido por el estudio en detalle de la relajación del mismo con vistas a

estimar el campo de tensiones previo a la intervención.

Entre las técnicas no destructivas, merece la pena señalar aquellas de uso amplio, como inspecciones por ultrasonido, medidas magnéticas o estudios con fuentes de radiación como los rayos X y los neutrones. Entre estas últimas, se han desarrollado en las últimas dos décadas una gran variedad de técnicas de análisis no destructivo mediante haces de neutrones ampliamente utilizadas en el ámbito tecnológico e industrial. En el presente artículo nos centraremos en el empleo de haces de neutrones para la obtención de imágenes y para el análisis de tensiones residuales, dado que son las técnicas que podrían

FRANCISCO JAVIER BERMEJO

es profesor de Investigación del Instituto de Estructura de la Materia del CESIC. Su actividad científica se centra en el uso de haces de neutrones para el estudio de materia condensada

FERNANDO SORDO

es responsable de la división de Blancos y Aplicaciones del Consorcio ESS-BILBAO. Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid. Su actividad se centra en el diseño de blancos de producción de neutrones para investigación.

FÉLIX FERNÁNDEZ-ALONSO

es profesor en la fuente de espalación ISIS del Rutherford Appleton Laboratory en el Reino Unido. Doctor en química física por la Universidad de Stanford, EEUU. En ISIS, dirige las actividades del Grupo de Espectroscopía Molecular, centradas en el desarrollo y uso de técnicas neutrónicas para el estudio de tecnologías y materiales sostenibles.

ANTONIO RIVERA

es profesor/investigador en el Instituto de Fusión Nuclear (UPM). Doctor por la Universidad Politécnica de Delft. Su actividad investigadora se centra en el estudio de materiales para aplicaciones en futuras plantas de Fusión Nuclear.

JOSÉ MANUEL PERLADO

es catedrático de Física Nuclear en la Universidad Politécnica de Madrid y director del Instituto de Fusión Nuclear. Representante del Gobierno español en el Comité Consultivo de la Unión Europea/Euratom y asesor de la representación española en el Programa *Keep in Touch* de Fusión Nuclear Inercial.

tener una mayor repercusión en los sistemas de control de calidad. Antes de abordar ambas técnicas, conviene resaltar ciertos aspectos de la interacción de los neutrones con la materia.

La interacción de los neutrones con la materia presenta grandes diferencias respecto a la interacción de electrones o los rayos X, lo cual confiere a estas técnicas neutrónicas ciertas peculiaridades así como ventajas:

- Los neutrones son partículas sin carga, por lo que interactúan directamente con los núcleos atómicos.
- La interacción de un neutrón con un núcleo atómico cambia dependiendo del estado isotópico. Como ejemplo, la dispersión de un material hidrogenado es radicalmente

diferente que la del mismo material si estuviese deuterado.

- La interacción de los neutrones es relativamente débil, por lo que pueden recorrer grandes espesores de material. Esta característica reviste especial relevancia ya que, al contrario que en caso de rayos X, permite explorar el interior de sólidos en bruto de forma no destructiva.
- Si los neutrones tienen una energía suficientemente baja, su longitud de onda es comparable con la distancia entre átomos de una red cristalina, dando lugar a procesos de interferencia y difracción.

La Figura 1 muestra una representación esquemática de la diferencia entre la interacción de neutrones y rayos X con diferentes elementos. Los rayos X producen una respuesta lineal, proporcional al número de electrones en la corteza del átomo, es decir se frenan más cuanto más pesado es el elemento. Tal como se ve en la figura, los elementos ligeros como el hidrógeno o el carbono son prácticamente transparentes a los rayos X, mientras que los pesados como el plomo son muy opacos. Por el contrario, la interacción de los neutrones con el material no guarda ninguna proporcionalidad con el número de electrones, aunque sí con la presencia o ausencia de momentos magnéticos. Dos elementos de número atómico similar pueden tener una respuesta a los neutrones significativamente distinta y por tanto pueden diferenciarse, como por ejemplo el aluminio y el magnesio o el hierro y el zinc.

Esta diferencia en el comportamiento de neutrones y rayos X hace que ambas partículas proporcionen información complementaria. No obstante, las técnicas de inspección mediante haces de neutrones no han llegado a implantarse de forma generalizada en el ámbito industrial debido a la complejidad del proceso de producción de neutrones.

Los nuevos desarrollos en el campo de los aceleradores de partículas para aplicaciones médicas, han permitido volver a considerar estas técnicas de inspección en un contexto industrial.

IMAGEN CON NEUTRONES

La neutronografía es una técnica análoga a la radiografía, en la cual se hace incidir un haz de neutrones colimado sobre el volumen de material a estudiar, situando un detector en el lado opuesto. La Figura 2 muestra un esquema del proceso. Los neutrones, son dispersados o

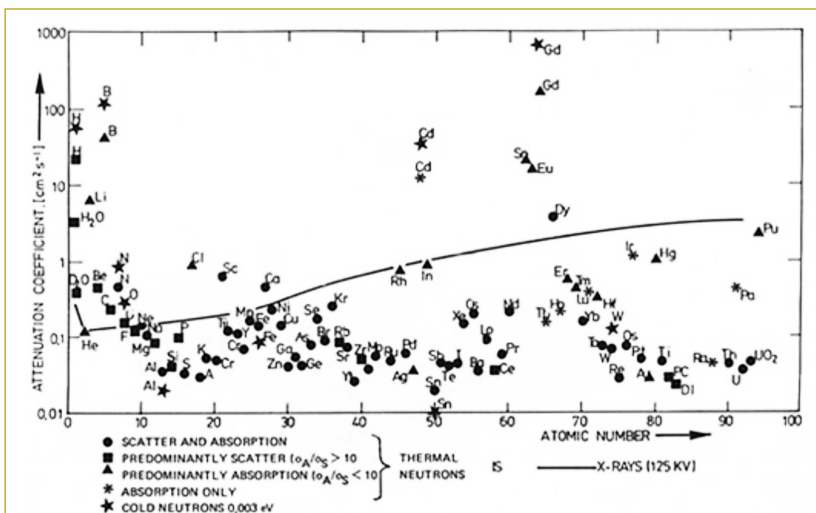


Figura 1: Representación esquemática de la interacción de neutrones y rayos X con diferentes elementos.

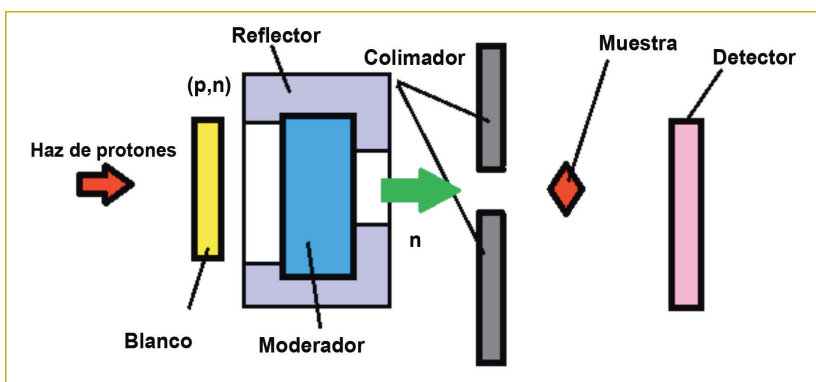


Figura 2: Esquema de una fuente de neutrones para neutronografía guiada por un acelerador.

capturados en función de la sección eficaz de los isótopos del material a estudiar y no todos llegan al detector, con lo que se obtiene una imagen del objeto.

Tal como se comentó en el apartado anterior, en el caso los rayos X, la interacción es proporcional al número atómico del material, por tanto no pueden examinarse materiales ligeros (por ejemplo, en pilas de litio, celdas de combustible, o electrolitos sólidos) y por lo tanto resulta muy difícil distinguir materiales con un número atómico similar. Los neutrones sin embargo muestran una interacción muy importante con elementos ligeros, especialmente con el hidrógeno, por lo que los materiales hidrogenados (hidrógeno molecular, hidrocarburos, agua, polímeros, ...) aparecen nítidamente en las imágenes. Por otro lado, la interacción de elementos próximos en número atómico puede ser sustancialmente distinta como en el caso del litio, cloro, titanio, hierro, níquel o gadolinio, lo que permite diferenciarlos.

Las Figuras 3 y 4 muestra dos imágenes del mismo objeto tomadas mediante rayos X y neutrones. Se puede apreciar que la información obtenida mediante ambas técnicas resulta complementaria dado que los rayos X no permiten apreciar ni los elementos ligeros ni aquellos ocultos por elementos pesados, sin embargo permiten observar detalles de la geometría del objeto que no aparecen de forma nítida en la imagen con neutrones.

Al igual que en el caso de los fotones, la interacción de los neutrones con el material cambia con su energía. En la mayoría de las instalaciones se utilizan neutrones de espectro térmico (energía media de ~ 0.025 eV), dado que en este rango de energía se incrementa considerablemente la interacción de los neutrones con el material. En este nivel energético, se pueden obtener imágenes precisas con espesores de muestra de 5–10 cm de acero. No obstante, algunas propuestas realizadas durante los últimos años buscan utilizar neutrones de mayor energía (~ 3 MeV) para

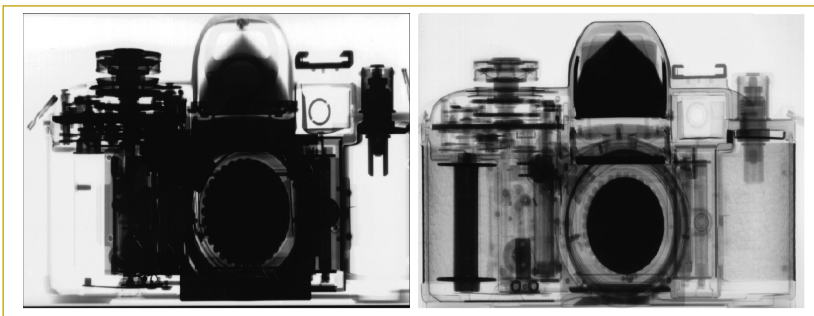


Figura 3: Imagen de un mismo objeto con rayos X (izquierda) y neutrones (derecha) [1].

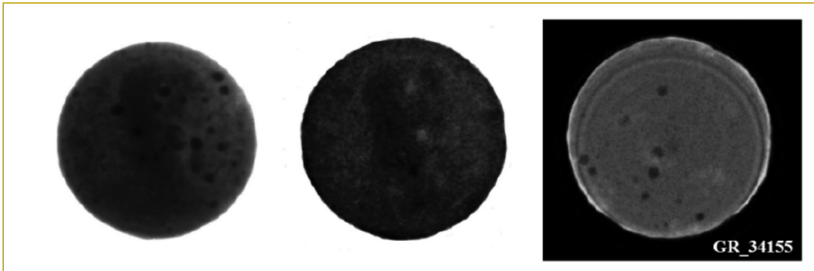


Figura 4: Imagen de una moneda de cobre de la Grecia clásica mediante rayos X (izquierda) y neutrones (centro y derecha) [2].

incrementar el espesor de material que puede analizarse, llegando en algunos casos hasta los 100 cm en hormigón [3].

De forma análoga a las técnicas de tomografía con rayos X, en algunas instalaciones se realizan series de imágenes variando el ángulo entre el objeto y el detector para realizar reconstrucciones tomográficas o tridimensionales. La Figura 5 muestra los resultados obtenidos en la reconstrucción tridimensional de un bloque de hormigón en el centro japonés de Riken [5].

La resolución espacial de la neutrografía varía en función de la po-

tencia de la fuente y la divergencia del haz de neutrones. En instalaciones como PSI [4], se pueden obtener imágenes con una resolución espacial por debajo de 50 μm . Típicamente para la obtención de una imagen se requiere un flujo de neutrones térmicos en la muestra de 10^5 – 10^6 $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (menos de un minuto de tiempo de exposición).

Estos valores de flujo, a pesar de ser modestos comparados con los requisitos de otras técnicas neutrónicas, no son fáciles de conseguir a pesar del indudable interés de las imágenes neutronográficas.

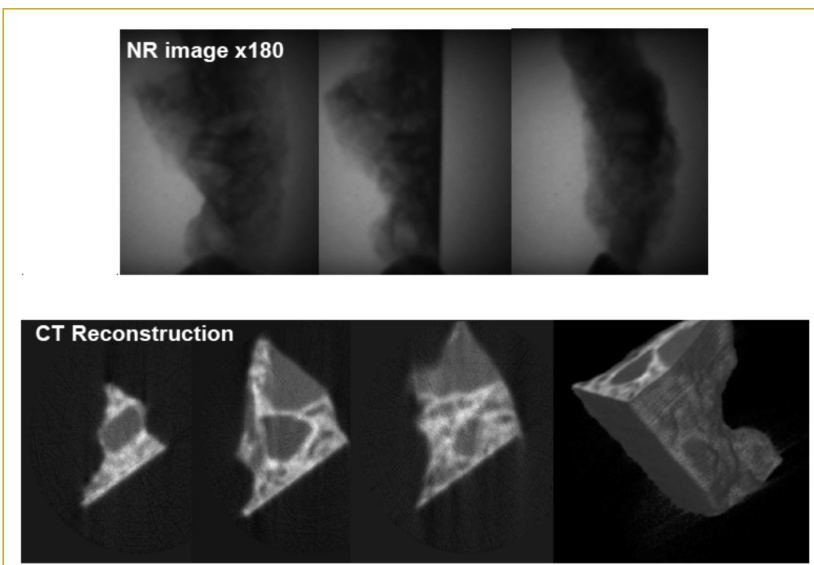


Figura 5: Reconstrucción tridimensional de una muestra de hormigón realizada por el equipo de RIKEN [5].

DETERMINACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES

El objeto de este tipo de inspección no destructiva consiste en la medida de los campos de tensiones residuales en un material, ya sea este metálico, cerámico o compuesto.

La evaluación de las tensiones residuales presenta gran interés en ingeniería, ya que el conocimiento de tales tensiones y su distribución permite estimar la capacidad de carga del material y su vida útil debido a fatiga. Las primeras evaluaciones se realizaron por medio de difracción de rayos X, técnica que es de aplicación en casos en los que el estudio requiera únicamente la exploración de las superficies del material, penetrando hasta un máximo de unos 100 μm .

El fundamento de la técnica se basa en determinar los cambios en la separación entre los planos de una red cristalina. La estructura atómica de cualquier cristal puede describirse en términos de planos de separación interatómica característicos del orden de fracciones del nanómetro. En un material isotropo libre de tensiones, estas distancias son iguales a lo largo de las direcciones principales en todo el volumen del cristal y por tanto la estructura cristalina puede describirse por medio de un conjunto modesto de parámetros. Sin embargo, al someter el material a tensión, este se deforma, incluso a nivel atómico, por lo que las distancias interplanares pueden cambiar con respecto a los valores del material libre de tensiones. Es posible entonces estudiar de forma cuantitativa la magnitud de tales cambios ya que estos modifican el patrón de difracción de los neutrones con respecto al material virgen. Tales cambios que lleva a deformaciones medibles se producen por tratamientos tales como la soldadura o por deformaciones plásticas inducidas por los procesos de mecanizado.

Estimados los cambios de distancia interplanar en la red cristalina podemos evaluar los desplazamientos, y en base a estos las tensiones residuales presentes en el material ya sean debidas a procesos de fabricación o al empleo del mismo en condiciones de operación.

La medida completa de los elementos del tensor de deformaciones requiere efectuar medidas con la pieza posicionada en seis orientaciones determinadas, lo que a día de hoy se lleva a cabo montando esta sobre un hexápodo. Una vez determinados los elementos del tensor de deformaciones, el cálculo de los elementos del tensor de tensiones se lleva a cabo de forma sencilla, siendo la única información adicional requerida el módulo de Young del material así como su relación de Poisson.



Figura 6: Posicionamiento de un elemento de tubería para la evaluación de sus tensiones residuales.

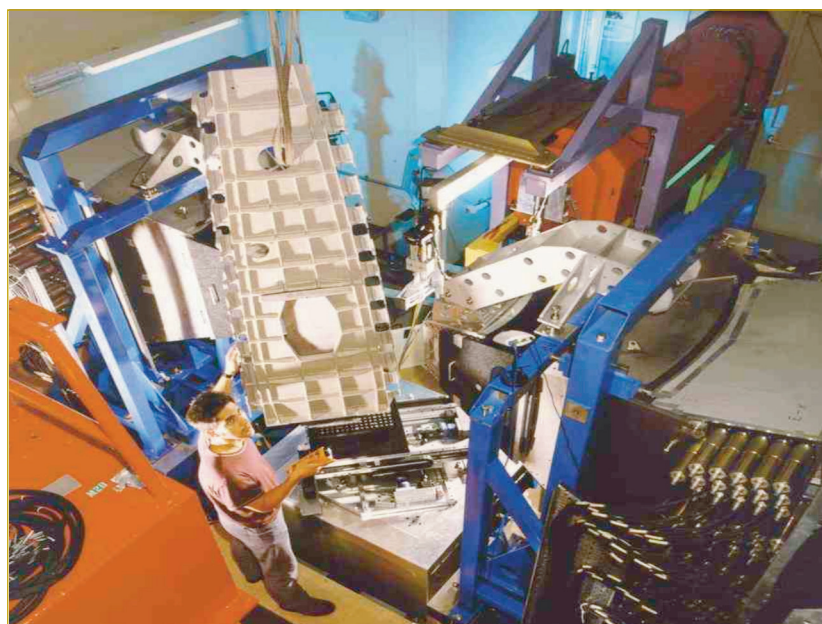


Figura 7: Posicionamiento de una pieza de Airbus en el instrumento ENGIN-X de la fuente ISIS.

A día de hoy, las medidas con neutrones permiten determinar tensiones residuales a profundidades de hasta unos 2.5 cm en acero o 7 cm en aluminio. El tipo de materiales examinados es tremendamente amplio e incluye materiales sometidos a fatiga tales como raíles de tren, tuberías sometidas a altas presiones y temperatura, palas de turbina, componentes de la industria aeronáutica, virtualmente todos los tipos de soldadura, componentes para reactores nucleares, o componentes para la industria militar.

La Figura 6 que se adjunta, muestra el posicionamiento de una de las piezas de tubería estudiadas por *The Welding Institute* en colaboración con ISIS sobre el efecto de los procedimientos de instalación sobre las tensiones que han de soportar algunas soldaduras críticas

en tuberías destinadas a plataformas *off-shore*. La Figura 7 muestra el posicionamiento de un segmento de ala de uno de los modelos de Airbus, llevado a cabo en el instrumento Engin-X de la fuente de neutrones pulsados ISIS, del Rutherford Appleton Laboratory, en el Reino Unido.

El instrumento es pues un difractómetro de neutrones especialmente adaptado para este tipo de estudios, que cuenta con dos bancos de detectores de neutrones por centelleo basados en ZnS situados a 90 grados con respecto al haz incidente. La instalación además de contar con equipo para entorno de muestra para control de presión y temperatura, cuenta también con un banco de pruebas capaz de generar cargas de hasta 100 kN.

Aunque estos tipos de instrumen-

tos se han construido en fuentes de alto flujo neutrónico, existen líneas de trabajo para desarrollar versiones equivalentes en fuentes de menor flujo basadas en aceleradores.

FUENTES COMPACTAS DE NEUTRONES

Tal como se comentó en las secciones anteriores, el gran reto de las imágenes basadas en haces de neutrones reside en la disponibilidad de una fuente de neutrones suficientemente intensa como para garantizar un flujo de neutrones térmicos y colimados en la muestra en el rango $105\text{--}106\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

La producción masiva de neutrones para experimentación se ha basado durante muchos años en dos tipos de reacciones nucleares: las reacciones de fisión típica de los reactores convencionales y las reacciones de espalación. En ambos casos se requiere una instalación realmente compleja con un coste elevado. Los nuevos reactores de baja potencia para investigación superan los 200 millones de euros [10, 11], mientras que las fuentes de espalación de última generación (SNS, JPARC, ISIS-TS2) superan ampliamente los 500 millones de euros. En ambos casos se trata de grandes proyectos de investigación financiados con fondos públicos, muy lejos de los niveles de inversión que pueden resultar interesantes en sistemas de inspección y control de calidad industriales.

En el extremo opuesto se encuentran los generadores portátiles de neutrones, basados en desintegraciones radiactivas o en pequeños aceleradores de deuterio (reacción de fusión D+T), pero estas fuentes se encuentran muy lejos de los niveles de intensidad necesarios. Por tanto, las técnicas tradicionales de producción de neutrones no permiten la implementación de inspecciones mediante haces de neutrones en el ámbito industrial.

Durante los últimos años han surgido varios proyectos científicos basados en la producción de neutrones mediante la interacción de protones de baja energía con núcleos ligeros [por ejemplo, $\text{Li}(p,n)$ o $\text{Be}(p,n)$]. Algunos ejemplos de este concepto son la fuente LENS [6] centro de análisis de la materia de la universidad de Indiana (EE UU) [4], la CHPS en la universidad de Tsinghua (Beijing, China) [7], el proyecto de fuente de neutrones de ESS-Bilbao [8], o la gran instalación de irradiación de materiales para fusión IFNIF [9].

La reacción de fisión produce una media de dos neutrones por cada átomo fisionado, mientras que las reacciones de espalación presentan valores situados



Figura 8: Imagen del prototipo de la instalación RANS en el centro Riken de Japón.

entre 20–50 neutrones por protón en función de la energía del protón incidente. Las reacciones de baja energía en núcleos ligeros presentan valores de producción en el orden de 0.05–0.1 n/p, lo que las sitúa órdenes de magnitud por debajo de las reacciones típicamente utilizadas en fuentes de alta potencia.

No obstante, estas reacciones presentan dos ventajas fundamentales de cara al desarrollo de fuentes compactas para técnicas de inspección con neutrones:

- La primera de ellas, es que la interacción de protones sobre núcleos ligeros (Li o Be) produce muy pocos elementos radiactivos, de los cuales el más importante es el tritio. Por tanto son equipos que requieren unas medidas de protección radiológica mucho más próximas a las empleadas en máquinas de rayos X que a las empleadas en centrales nucleares o grandes fuentes de espalación.
- La segunda es que estas reacciones se pueden producir con protones de muy baja energía (2–50 MeV frente a los 300–2500 MeV de las reacciones de espalación). Los aceleradores diseñados para producir protones de 2–50 MeV tienen un coste asociado varios órdenes de magnitud inferior al de los aceleradores de alta energía.

Ambos factores suponen que el coste de construcción (blindaje, obra civil ...) y licenciamiento de este tipo de fuentes se encuentra en el rango que podría resultar de interés en el sector industrial.

Para obtener neutrones mediante este proceso, se hace incidir el haz de protones sobre una lámina de litio o berilio (denominada “blanco”) en la cual se generan los neutrones (Figura 2). Dado que los protones del acelerador tienen muy baja energía, su recorrido en el blanco es de pocos milímetros en el material. Esto da lugar a incrementos de temperatura importantes que generan fuertes tensiones mecánicas. Por ello, el diseño del blanco es uno de los puntos críticos en este tipo de sistemas.

Los neutrones generados, tienen una energía media en el rango de los ~MeV, por lo que es necesario introducir un material hidrogenado, típicamente agua

o polietileno, en el cual los neutrones pierdan su energía mediante colisiones con los átomos de hidrógeno. Este material (denominado “moderador”) se recubre de un elemento reflector (Figura 2), cuya misión es evitar la dispersión de los neutrones y así maximizar el flujo en el moderador y la producción de neutrones térmicos.

Finalmente se introduce en el sistema una guía de pequeña sección por la cual salen los neutrones generados en el moderador y se rodea con un material de blindaje, de modo que sólo los neutrones con un determinado ángulo de salida (divergencia) alcanzarán la muestra. El proceso completo tiene una eficiencia muy baja y sólo uno de cada 10000 neutrones sale por la guía con la dirección y la energía deseada.

Basándose en este tipo de fuentes de baja energía, en 2010 se propuso la construcción de generadores de neutrones relativamente compactos, con un coste situado en el entorno de los 4–5 millones de euros. El primer prototipo de estos sistemas es la Fuente RANS en el centro Riken [12] (Figura 8). Se trata de un equipo experimental diseñado para inspección de bloques de hormigón de obra civil y entró en operación a principios de 2013.

CONCLUSIONES

Durante los últimos años, las técnicas de inspección mediante haces de neutrones han cobrado un nuevo interés en el ámbito industrial debido al desarrollo de sistemas de producción de neutrones con requisitos de inversión situados entre 5–6 millones de euros.

La implementación de estas nuevas fuentes de neutrones, asociadas a sistemas de neutrografía o medidas de tensiones residuales, podría aportar nuevas herramientas de control de calidad a los procesos industriales de fabricación.

REFERENCIAS

- [1] McClellan Nuclear Research Center, UC Davis, <http://mnrc.ucdavis.edu>
- [2] Application of X-Ray and Neutron

Tomography to Study Antique Greek Bronze Coins with a High Lead Content
Griesser M, Traum R, Vondrovec K, Vontobel P, Lehmann EH, IOP CONF. SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 37, 012011 (2012). DOI: 10.1088/1757-899X/37/1/012011

- [3] A. Taketani. Development of the fast neutron imaging for thick concrete structures. RIKEN, UCANS-III.
- [4] E. Lehmann et al, Nondestruct. Test Eval. 16, 191–202 (2001), doi:10.1080/10589750108953075
- [6] C.M. Lavelle, D.V. Baxter, A. Bogdanov, V.P. Derenchuk, H. Kaiser, M.B. Leuschner, M.A. Lone, W. Lozowski, H. Nann, B.v. Przewoski, N. Remmes, T. Rinckel, Y. Shin, W.M. Snow, P.E. Sokol, Neutronic design and measured performance of the Low Energy Neutron Source (LENS) target moderator reflector assembly, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 587, Issues 2–3, 21 March 2008, Pages 324–341, ISSN 0168-9002, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.12.044>.
- [7] Q.Z Xing, L. Du, Y.J. Bai, J.C. Cai, C. Cheng, Q. Du, T.B. Du, X.L. Guan, X.W. Wang, Z.F. Xiong and others. Construction Status of the CPHS RFQ at Tsinghua University, IPAC, volume 11 pages 122, 2011
- [8] E. Abad, I. Arredondo, I. Badillo, D. Bolver, F.J. Bermejo, I. Bustinduy, D. Cano, D. Cortazar, D. de Cos, S. Djekic and others, ESS-Bilbao light-ion linear accelerator and neutron source: design and applications, Journal of Physics: Conference Series, Volume 325, number 1, pages 012003, 2011
- [9] M. Martone. IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity: Final report, Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione, Frascati (Italy) 1997
- [10] J. Shane Kennedy, Construction of the neutron beam facility at Australia's OPAL research reactor, Physica B: Condensed Matter, Volumes 385–386, Part 2, 15 November 2006, Pages 949–954, ISSN 0921-4526, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.280>.
- [11] http://www.riken.jp/en/pr/topics/2013/20130907_1/
- [12] <http://www.riken.jp/en/>.