

Difractómetro de grandes componentes para el reactor RA-10

SANTISTEBAN J.^{1,4,5,6}, SÁNCHEZ, F.^{2,4,5}, MOREIRA F.^{1,4,5}, GÓMEZ, S.^{2,4}, TARTAGLIONE A.^{1,5,6}, MALAMUD, F.^{1,5,6}, VICENTE ALVAREZ, M.^{1,5,6}, GIMÉNEZ M.^{1,5}, VIZCAÍNO P.^{3,4,6},

⁽¹⁾ Departamento de Física de Neutrones – Centro Atómico Bariloche

⁽²⁾ Departamento de Física de Reactores y Radiaciones – Centro Atómico Bariloche

⁽³⁾ Departamento de Tecnología del Circonio – Centro Atómico Ezeiza

⁽⁴⁾ CNEA

⁽⁵⁾ Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo

⁽⁶⁾ CONICET

En CNEA se encuentra en ejecución el “Proyecto RA-10” para la construcción de un reactor multipropósito. Entre los objetivos principales del RA-10 está la provisión de haces de neutrones para la realización de experimentos dentro de un amplio espectro de disciplinas científicas y tecnológicas. Por sus múltiples aplicaciones, la difracción de neutrones es una de las técnicas neutrónicas más populares. El gran poder de penetración de los neutrones (del orden de cm) permite investigar el interior de un objeto sin necesidad de cortarlo. Así es posible estudiar en forma no-destrucciona objetos macroscópicos y cuantificar la variación espacial de las fases cristalinas que lo componen, las orientaciones de esos cristallitos, y su nivel de deformación plástica y elástica. En particular, es posible determinar las tensiones internas en componentes mecánicos de gran porte, un tema de gran importancia dentro de la industria metal-mecánica. En este caso los planos cristalinos son utilizados como extensómetros microscópicos, y las pequeñas variaciones que existen en las distancias interplanares para las distintas direcciones de un objeto son utilizados para cuantificar el tensor completo de deformación elástica. La posibilidad de realizar experimentos de difracción sobre objetos intactos ha despertado también gran interés dentro de la comunidad dedicada al estudio y la conservación del patrimonio cultural.

Presentamos aquí el diseño básico de un difractómetro para el estudio de grandes componentes, para ser instalado en un haz térmico de la sala del reactor RA-10, es decir, directamente contra la pared del mismo. Se propone equiparlo con dos monocromadores diferentes, para poder optar entre mayor intensidad o mayor resolución. Los monocromadores propuestos son doblemente curvados, a fin de enfocar el haz sobre la posición de medición y optimizar la resolución del equipo para la reflexión de mayor interés. Un componente central del instrumento es el portamuestras, consistente en una mesa con capacidad de posicionar componentes de hasta ~300kg de peso con una precisión de ~20µm, una resolución espacial de ~1mm, y rotar los mismos a fin de explorar distintas direcciones. Presentaremos además avances realizados sobre un prototipo a menor escala, que comparte algunas características del diseño propuesto, que será instalado en el reactor RA-6 del Centro Atómico Bariloche.

Diffractometer for large objects for the RA-10 reactor

The “RA-10 Project” is a modern, multi-purpose, research reactor under CNEA development, which is expected to start operation in 2019. Among its capabilities, the reactor will provide both thermal- and cold- neutron beams for use in scientific research and technical developments. Neutron diffraction is perhaps the most popular of such techniques. Thermal neutrons penetrate deep within solid materials (typically cm), so it is indeed possible to investigate the interior of an object without the need to cut it or drill it. Hence, non-destructive investigations of macroscopic specimens can render a variety of microstructural information, such as the crystallographic phases present, the orientation of the composing crystallites, and the elastic and plastic deformation within the object. In particular, it is now possible to measure the residual stress within large mechanical components, using the crystal planes as microscopic strain gauges. Residual stresses represent an ever-growing issue within a wide range of industries (energy, automotive, aerospace, nuclear, etc).

We present here the basic design of a “Neutron Strain Scanner”, i.e., a diffractometer capable of studying bulky, heavy components, to be installed on a thermal beam in the reactor hall of the RA-10 research reactor. The instrument should be capable of handling components of up to ~300kg with a spatial resolution of ~1mm. Besides internal stress, the proposed instrument will provide a variety of microstructural information about the material (texture, dislocation densities, phase volumes, etc.) of direct interest to a wide range of scientific and technical communities (physical-chemistry, materials science, geology, archaeometry, etc.)

The proposed design includes two different monochromators of very different resolutions: (i) an elastically bent Silicon monochromator for strain scanning, and (ii) a Germanium monochromator for phase quantification and crystallographic textures.

A working prototype of the proposed instrument is currently being developed, and will be installed in the RA-6 research reactor in Centro Atómico Bariloche, CNEA, Argentina.

1. Introducción

Uno de los proyectos más importantes dentro de la CNEA es el "RA-10", un reactor nuclear multipropósito de diseño y fabricación nacional. El proyecto se inició en el año 2010 y la puesta en marcha del reactor está planeada para el año 2019.

El mismo será construido en el Centro Atómico Ezeiza y tiene tres objetivos principales:

- i) Aumentar la producción de radioisótopos para proveer la demanda nacional y regional.
- ii) Desarrollar ensayos de nuevos combustibles y materiales nucleares mediante una facilidad de irradiación.
- iii) Producir haces intensos de neutrones para proveer al sistema científico-tecnológico nacional de técnicas neutrónicas avanzadas.

En relación al objetivo iii), 8 haces de neutrones emergerán del reactor [1]. La mitad de estos haces (2 térmicos+2 fríos) serán conducidos por guías de neutrones hacia un "hall de haces", con amplio espacio para la instalación de una variedad de instrumentos. La otra mitad estará disponible en el "hall del reactor", sala inmediatamente adyacente al blindaje del núcleo.

En este trabajo proponemos instalar en esta sala un instrumento de interés dentro del área de la ciencia e ingeniería de materiales. Entre sus aplicaciones más importantes, este equipo permitirá determinar las tensiones internas dentro de componentes mecánicos en forma no-destructiva.



Figura 1. Vista artística del reactor RA-10

2. Tensiones residuales

Las fuerzas que actúan dentro de un objeto en ausencia de cargas externas se llaman tensiones internas o residuales. Son fuerzas similares a las que existen cuando tenemos un resorte comprimido mediante una traba. Al quitar la traba, el resorte manifiesta esta fuerza, liberando en forma repentina la energía asociada. Estas tensiones residuales pueden estar presentes en un componente o material sin que nosotros seamos conscientes de ello. Por este motivo, las tensiones residuales influyen en el comportamiento de los componentes mecánicos y pueden afectar su estabilidad estructural y dimensional y su capacidad de resistencia a la fractura.

Para ver esto último, imaginemos una fisura que aparece en un componente: si el material a ambos lados de la fisura está siendo traccionado la fisura se abrirá y propagará; pero si está en compresión la fisura tenderá a cerrarse y detenerse.

Por esto, un estado de tensión residual de tracción reduce la vida de un componente mecánico. Las tensiones residuales internas limitan, en consecuencia, la capacidad de carga y la seguridad de las estructuras mecánicas y pueden ser contrarrestadas sólo si existe un control que nos permite determinarlas en forma cuantitativa.

Idealmente, se desean determinar estas tensiones dentro de un componente sin tener que destruir o afectar al mismo.

Las tensiones residuales aparecen luego de procesos en los que las distintas partes de un objeto se deforman en forma desigual. Esto puede ocurrir por ejemplo al calentarlo o enfriarlo, si aparecen grandes diferencias de temperatura en una distancia muy pequeña (como puede ocurrir por ejemplo al realizar una soldadura). También pueden aparecer al deformarlo mecánicamente, con algunas zonas deformándose notablemente más que otras debido a una concentración de la carga aplicada.

Los procesos de manufactura utilizados en la industria metal-mecánica (laminados, estampados,

maquinado, soldado, etc.) irremediablemente introducen tensiones residuales. Por esto, los componentes más sensibles son usualmente tratados térmicamente con el objeto de relajar estas tensiones y de optimizar sus propiedades mecánicas.

En producción, el conocimiento de las tensiones residuales permite mejorar la calidad de componentes industriales u optimizar los criterios de diseño en muchas aplicaciones. Por esto, existe en la actualidad una gran demanda científica e industrial por mediciones de tensiones internas (confiables y de alta calidad). La constante búsqueda por reducir

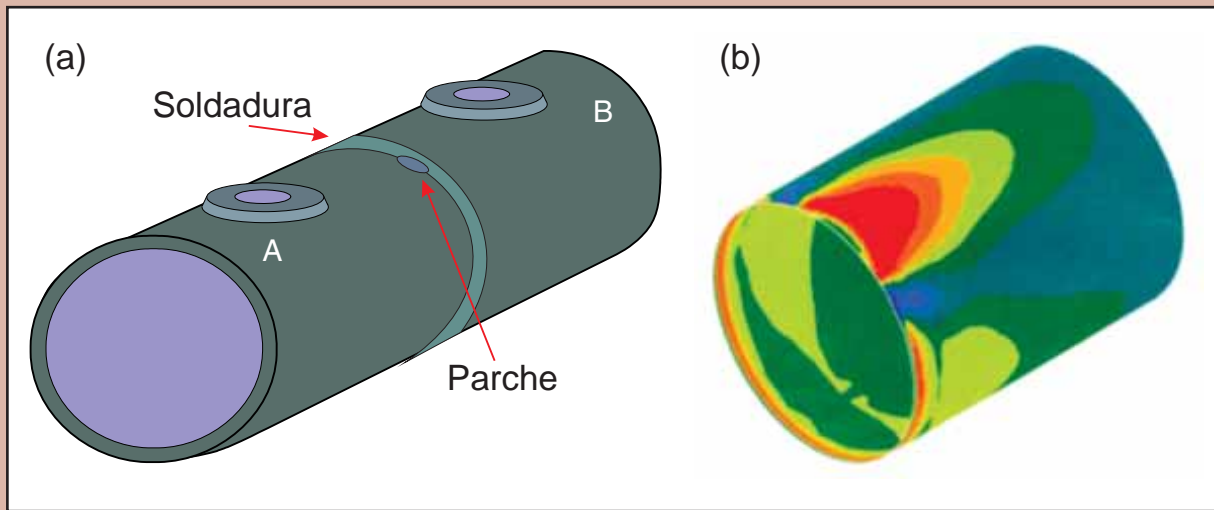


Figura 2. (a) Modelo de recipiente de presión conteniendo un parche en una soldadura, de dimensiones similares al componente de una central nuclear tipo AGR.

Las tensiones alrededor del parche fueron determinadas según se describe más abajo
 (b) Cálculo de elementos finitos de tensiones internas resultantes del “emparchado” de una soldadura en un recipiente de presión. (c) Foto del modelo siendo investigado en el instrumento REST, del reactor de Studsvik, Suecia [2]

el peso y optimizar la performance en muchas aplicaciones sugiere que esta demanda continuará en aumento.

Un caso típico de estudio se muestra en la Figura 2, en este caso un intercambiador de calor de una central nuclear avanzada refrigerada por gas (Advanced Gas Reactor). Este componente está compuesto por grandes tubos de acero austenítico de paredes gruesas, que son unidos por medio de soldaduras de arco sumergido realizadas en forma manual. Estas componentes fueron inspeccionadas luego de su fabricación, y en caso de encontrarse fisuras, una de las opciones de remediación involucró el “emparchado” de la soldadura defectuosa. Este procedimiento consiste en extraer el material afectado y rellenarlo nuevamente con metal fundido, lo que introduce un campo muy localizado de tensiones triaxiales, muy difíciles de estimar aún con los métodos de cálculo más avanzados (Figura 2-b). A mediano plazo (~10000 y 50000 horas de operación) la aparición de fisuras cercanas a las zonas reparadas obligó a un análisis estructural completo de estas piezas, a fin de definir si la central podía seguir operando en forma segura.

Para este análisis, una réplica del componente en operación fue creada y reparada siguiendo los mismos procedimientos utilizados durante la construcción de la central (Figura 2-a). El componente fue luego llevado al instrumento REST, un difractómetro del Laboratorio de Investigaciones Neutrónicas de Studsvik (Suecia), para determinar el campo de tensiones internas introducidas por dicho proceso mediante experimentos de difracción de neutrones (Figura 2-c).

3. Escaner neutrónico de deformación

Un “Escáner Neutrónico de Deformación” (*Neutron Strain Scanner*) es un difractómetro de neutrones en el que es posible estudiar objetos de gran tamaño. Como se muestra esquemáticamente en la Figura 3, estos instrumentos permiten investigar un pequeño volumen en el interior de un objeto (identificado por el pequeño cuadrado naranja oscuro), inspeccionándolo con un haz de neutrones de aproximadamente 2x2 mm² de sección.

En la figura, el estudio se está realizando sobre el modelo de recipiente de presión descrito en la sección anterior, que contiene un “parche” en una soldadura. La reflexión de los neutrones en los planos cristalinos que componen el material posibilita estudiar las tensiones internas introducidas por esta reparación en forma tridimensional. Para

producir un mapa de la deformación en la región de interés (identificada por el rectángulo azul en línea punteada), el pequeño volumen de medición debe ser trasladado a través del mismo.

En la práctica, el volumen de medición se mantiene en una posición fija del espacio, y es el componente el que es trasladado delante del haz de neutrones. La figura muestra un mapa de la deformación elástica alrededor del parche medido de esta forma, donde los círculos indican las posiciones en donde se realizó la medición.

Para determinar la deformación elástica, los planos cristalinos del material son utilizados como extensómetros microscópicos, según se ejemplifica en la parte superior derecha de la Figura 3. La presencia de tensiones provoca leves variaciones en la distancia d que separa los planos cristalinos, que son determinadas por el detector que se muestra en la figura. En aquellas direcciones sujetas a tensiones de compresión los planos cristalinos se acercan entre sí y; en forma análoga, se alejan en aquellas direcciones sujetas a esfuerzos de tracción. Así, la deformación elástica dentro del componente que se muestra en la Figura 3, en la posición indicada por el volumen de medición naranja, y a lo largo de la dirección indicada por la flecha roja es:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}$$

donde d_0 es la distancia entre los planos atómicos medida para un material libre de tensiones. En la realidad, en vez de determinar estas distancias en forma directa, el detector de neutrones (colocado a aproximadamente 90° del haz incidente) mide en forma muy precisa el ángulo θ en el que aparece el pico de difracción asociado a la familia de planos cristalinos elegida.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -(\theta - \theta_0) \cot \theta_0$$

con θ_0 el ángulo medido para el material libre de tensiones. Para determinar el tensor completo de deformación para esa posición es necesario medir la deformación a lo largo de otras direcciones, muestreando el mismo volumen de material. Esto se realiza rotando el objeto de la Figura 3 alrededor de dos ejes que pasen por el centro del volumen de medición. Para determinar de las tensiones internas, el tensor de tensiones es calculado utilizando la ley

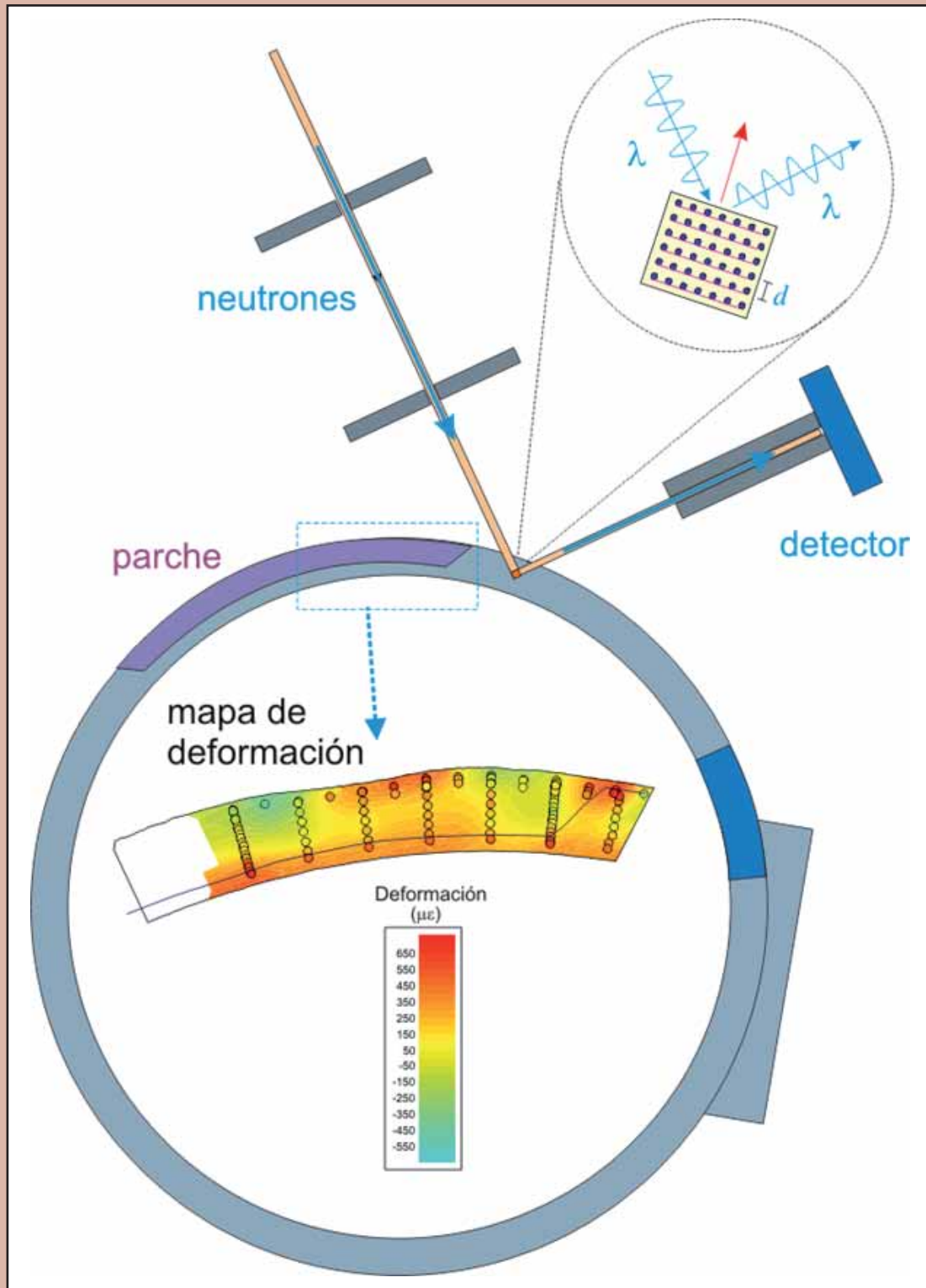


Figura 3. Esquema de la medición de la deformación elástica alrededor de un “parche” de una soldadura en un recipiente de presión. El equipo sólo “ve” el pequeño volumen de medición definido por la intersección del haz incidente y el haz difractado

de Hooke (generalizada) y el tensor de deformaciones medido.

Además de las tensiones internas, el difractómetro permite medir otras características microestructurales del material. Por ejemplo, la densidad de dislocaciones y la textura cristalográfica de los componentes estructurales base circonio son importantes debido a su rol en la deformación anisotrópica que experimentan en servicio, por los intensos flujos de neutrones rápidos a que se encuentran sometidos. Por esto, en los tubos de presión de las centrales tipo CANDU estas propiedades son especificadas cuantitativamente por el diseñador (AECL) [3].

Los tubos de presión para la extensión de vida de la Central Nuclear Embalse son fabricados en el Centro Atómico Ezeiza por FAESA, a través de una colaboración con el Departamento de Tecnología del Circonio de CNEA [4]. Para proyectos futuros, el equipo propuesto permitiría caracterizar en forma no destructiva la variación espacial de estas propiedades en distintas etapas del proceso de fabricación, a fin de optimizar el proceso de producción de los mismos. La factibilidad de este tipo de estudios sobre los tubos producidos en Ezeiza ha quedado demostrada mediante experimentos realizados en fuentes de neutrones del exterior sobre pequeñas muestras extraídas de los extremos de los mismos [5].

Además de su utilización para atacar problemas típicos de la industria metal-mecánica, este tipo de instrumentos permite obtener información única acerca de los procesos por los que fueron producidos muchos de los objetos que nos rodean, ya sean naturales o creados por el hombre.

En Geomorfología, el estudio de la textura cristalográfica y las tensiones internas que aparecen en las rocas y en los hielos continentales permite inferir detalles acerca de las presiones y los tiempos característicos involucrados en los procesos geológicos que los llevaron hasta su condición actual.

En este caso, la capacidad única del instrumento reside en que permite caracterizar muestras intrínsecamente heterogéneas, compuestas por cristalitas de tamaño relativamente grandes, que resultan muy difíciles de caracterizar por difracción de rayos X [6].

En Arqueometría y el estudio de objetos de arte, la textura cristalográfica y los perfiles de tensiones internas dentro de una pieza permiten discriminar si la misma fue producida a partir de un molde, o si involucró procesos de deformación plástica (doblado, martillado, etc.), y/o tratamientos térmicos especiales [7, 8].

4. Propuesta para el RA-10

En base a lo expuesto, proponemos aquí dotar al reactor RA-10 de un escáner neutrónico de deformación, es decir, de un difractómetro que permita investigar objetos de gran tamaño. Casi todos los laboratorios de haces de neutrones del mundo poseen uno o más instrumentos de este tipo, con pequeñas variaciones en su diseño de acuerdo al tamaño de los objetos que se desea caracterizar, o del tipo de problemas en los que será mayoritariamente utilizado.

Debido a su creciente popularidad, existen varios libros dedicados a esta técnica [9-11], y el Organismo Internacional de Energía Atómica ha publicado un documento dedicado íntegramente a los aspectos técnicos de la implementación de este tipo de equipos en reactores de investigación [12]. Los requerimientos característicos de este tipo de difractómetros son:

- La provisión un haz intenso de neutrones monocromáticos que produzca picos de difracción muy agostos.
- La capacidad de definir un pequeño volumen de medición, de donde proviene la señal investigada.
- La posibilidad de posicionar en forma precisa el objeto que se desea estudiar y ubicar una zona específica del mismo en el volumen de medición.
- La capacidad de rotar la muestra alrededor de un eje que pase por el volumen de medición.

Entre los instrumentos que existen a nivel internacional hemos elegido utilizar como referencia de diseño el instrumento Stress-Spec, del reactor FRM-II de la Universidad Técnica de Múnich, Alemania [13]. La Figura 4 presenta un diagrama esquemático (arriba) y una foto del mismo (abajo). El difractómetro se ubica en el "hall del reactor" ubicado dentro del edificio que contiene al reactor, directamente sobre la pared del mismo. Brevemente, un haz de neutrones colimado es extraído de la fuente térmica del reactor, y neutrones de la longitud de onda deseada son seleccionados por medio de un monocromador, ubicado dentro de un blindaje de grandes dimensiones que posee una apertura móvil.

El haz monocromático emerge de este blindaje por otra apertura e incide sobre la muestra a investigar, que puede ser rotada y trasladada en frente del haz en forma remota por medio de una mesa posicionadora. Como mencionamos, debido al gran poder de penetración de los neutrones, el objeto a investigar puede ser de grandes dimensiones, como el recipiente de presión que se muestra en la foto de la Figura 2.

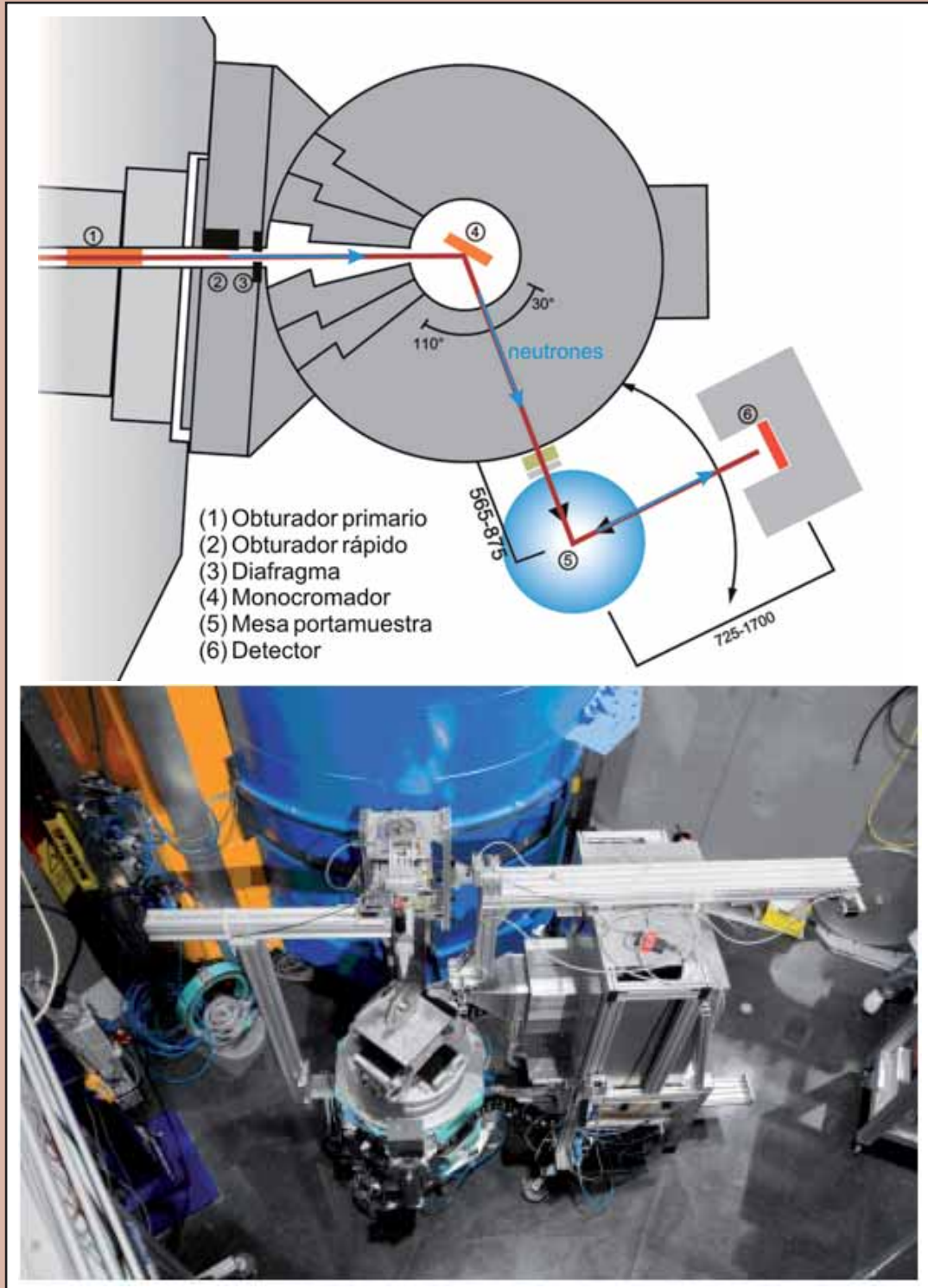


Figura 4. Esquema (arriba) y foto (abajo) del difractor Stress-Spec del reactor FRM-II de la Universidad Técnica de Múnich [2], tomado como referencia del equipo propuesto para el RA-10. El haz de neutrones térmicos que emerge del reactor es reflejado por un monocromador, y sólo neutrones de una longitud seleccionada inciden sobre la muestra.

Un detector de neutrones sensible a posición es colocado a aproximadamente 90° del haz incidente, para observar el pico de difracción de la reflexión (*hkl*) seleccionada, a fin de estudiar la variación de la distancia entre los planos cristalinos que pertenecen a esta familia. Un conjunto de aperturas y colimadores movidos en forma remota permite cambiar en forma precisa las dimensiones del haz de neutrones, a fin de definir un volumen de medición que se ajuste a la geometría del objeto bajo estudio.

Asimismo, el detector se encuentra dentro de un blindaje y posee en su ventana aperturas controlables, para reducir al mínimo la señal proveniente de neutrones que no fueron difractados en el volumen de medición.

Stress-Spec posee tres tipos de monocromadores (silicio curvado elásticamente, germanio y grafito pirolítico), que proveen un amplio abanico de longitudes de onda y divergencias para el haz incidente, que se seleccionan de acuerdo al material y el tipo de estudio que se desee realizar.

Típicamente, el monocromador de silicio se utiliza para los estudios de tensiones internas y el de germanio principalmente para los estudios de textura cristalográfica. El ángulo donde se ubica el detector y las distancias monocromador-muestra y muestra-detector pueden ser modificadas y así optimizar el flujo y la resolución para cada material investigado. En el año 2014 iniciamos contactos con el responsable de Stress-Spec (Dr. M. Hoffman) y hemos visitado el instrumento, para iniciar una colaboración para adaptar el diseño a las necesidades específicas del reactor RA-10.

5. Prototipo

El diseño, construcción e instalación de los difractómetros de neutrones operando en reactores nucleares son típicamente llevados a cabo por grupos pertenecientes o asociados a la institución responsable de la operación del reactor.

Existe a nivel internacional un pequeño número de empresas de ingeniería que puede proveer instrumentos "llave-en-mano", pero estos casos representan una fracción muy baja del total de difractómetros instalados, y se da en países que no poseen un sistema científico-tecnológico capaz de desarrollarlos. La práctica usual es que el diseño conceptual y básico del instrumento responda a las demandas específicas de la institución o de los grupos de investigación asociados; y que la adquisición, fabricación, e integración de los distintos componentes involucrados en el diseño sean provistos o contratados a terceras partes.

En el Centro Atómico Bariloche existe una larga experiencia en el desarrollo de instrumentos en haces pulsados de neutrones producidos mediante un LINAC [14] y, más recientemente, también en haces estacionarios producidos por el reactor RA-6 [15]. Así, como primer paso hacia la provisión del instrumento propuesto para el futuro reactor RA-10, se decidió desarrollar un prototipo de características similares pero con menores prestaciones que será instalado en el reactor RA-6 [16].

El prototipo será un difractómetro de neutrones completamente operativo, optimizado para la medición de textura cristalográfica, tensiones internas y densidad de dislocaciones. Sus limitaciones provienen del menor flujo de neutrones incidente sobre el monocromador, que para el reactor RA-6 es aproximadamente tres órdenes de magnitud más bajo que el previsto para el RA-10. Por este motivo los estudios insumirán tiempos de medición relativamente largos (días), y no se prevé estudiar componentes de grandes dimensiones, sino muestras pequeñas $\sim(1 \times 1 \times 5) \text{ cm}^3$, u objetos de dimensiones típicas en el orden de los $(10 \times 5 \times 1) \text{ cm}^3$.

Debido al bajo flujo, la resolución espacial esperada también será considerablemente más gruesa. Un corte del modelo 3D del prototipo diseñado se muestra en la Figura 5.

Los componentes principales del instrumento ya han sido adquiridos (monocromador de silicio elásticamente curvado, detector de neutrones sensible a posición, goniómetro portamuestras, mesa posicionadora, etc.).

Actualmente, se están preparando las licitaciones para la adquisición y fabricación del blindaje del monocromador. Dicho blindaje debe garantizar una tasa de dosis promedio alrededor de la instalación inferior a $10 \mu\text{Sv/h}$ total, y en ningún punto accesible sin barrera física una dosis mayor a los $200 \mu\text{Sv/h}$.

Además de la provisión de un difractómetro de las características mencionadas para el Centro Atómico Bariloche, el diseño, implementación y operación del prototipo permitirá:

(i) Ganar experiencia directa en el diseño e implementación de instrumentos con haces monocromáticos en reactores de investigación. Cabe destacar que la mayor parte de futuros instrumentos del reactor RA-10 serán de este tipo.

(ii) Ganar experiencia operativa en las técnicas de determinación de tensiones internas, textura cristalográfica y densidad de dislocaciones por medio de difracción de neutrones, previa a su implementación en el reactor RA-10.

(iii) Formar recursos humanos para la plena explotación de las técnicas descriptas, contribuyendo a la oferta académica del Instituto Balseiro.

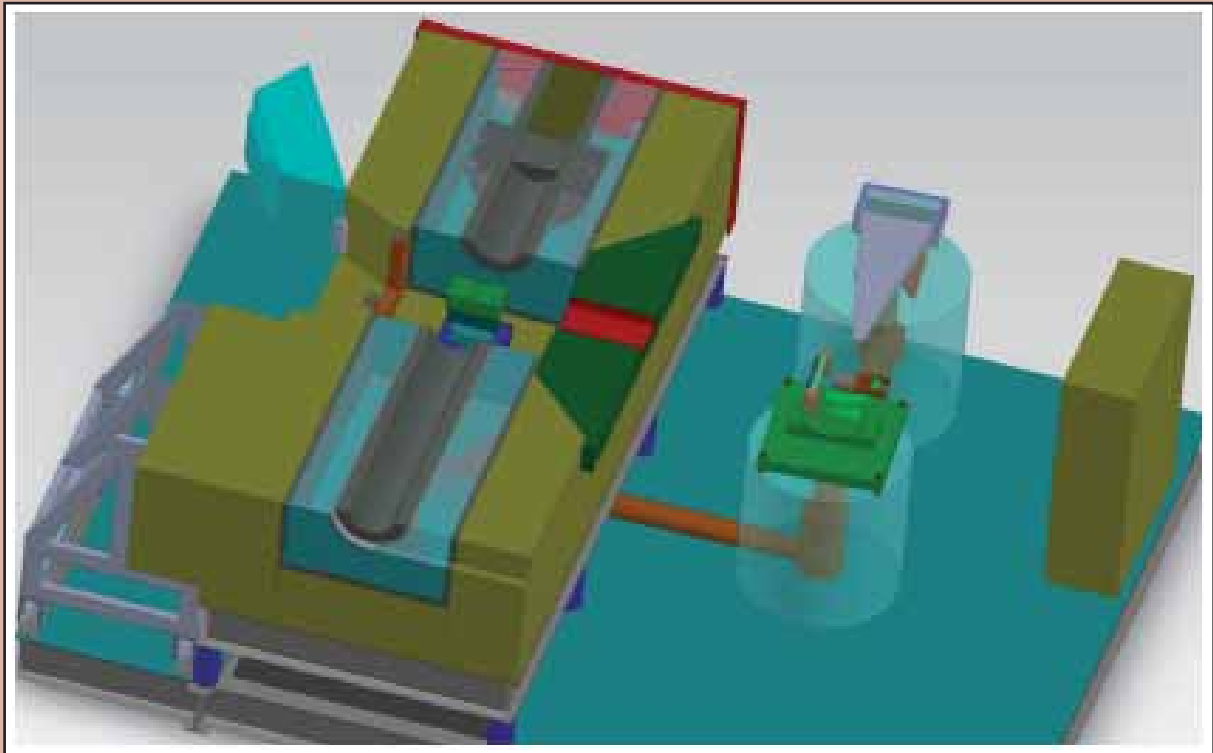


Figura 5. Vista en corte del modelo 3D del prototipo del difractómetro propuesto, a ser instalado en el reactor RA-6 del Centro Atómico Bariloche

6. Conclusiones

Debido a su gran poder de penetración, los haces de neutrones permiten estudiar el interior de un objeto sin necesidad de seccionarlo. En particular, la difracción de neutrones es la única técnica capaz de cuantificar en forma no-destruccionista las tensiones residuales en el interior de componentes metal-mecánicos. Estas tensiones afectan la vida útil del componente y se generan durante su manufactura u operación, debido a los procesos termo-mecánicos a los que se ve expuesto. Por esto, proponemos instalar en el futuro reactor RA-10 un “Escáner Neutrónico de Deformación”, es decir, un difractómetro de neutrones en el que sea posible estudiar objetos de gran tamaño. Este equipo ofrecería a la industria metal-mecánica local una herramienta única, que ayudaría a estimar y optimizar los procesos de manufactura. Además de las tensiones internas, el equipo propuesto permitiría cuantificar otras características microestructurales, tales como la densidad de dislocaciones, la textura cristalográfica y las fases cristalinas que lo componen.

Contribuyendo a esta propuesta, estamos desarrollando un prototipo a menor escala que será instalado en el reactor RA-6 del Centro Atómico Bariloche.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Rolando Granada, Herman Blaumann, Javier Dawidowski y Fabricio Brollo por su apoyo y motivación. Este trabajo fue financiado por la CNEA, el CONICET, la Universidad Nacional de Cuyo y el Organismo Nacional de Energía Atómica.

7. Referencias

- [1] F. Sánchez, A. Cintas, and H. Blaumann, “RA-10: Argentinean Multipurpose Reactor,” *Neutron News*, vol. 25, no. 4, pp. 6–8, Oct. 2014.
- [2] P. J. Bouchard, D. George, J. R. Santisteban, G. Bruno, M. Dutta, L. Edwards, E. Kingston, and D. J. Smith, “Measurement of the residual stresses in a stainless steel pipe girth weld containing long and

- short repairs," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 82, no. 4, pp. 299–310, Apr. 2005.
- [3] AECL, *Qualification Requirements-Pressure Tube Manufacturer Qualification* (2006)
- [4] AD Banchik, "Tecnología de Fabricación de Componentes Estructurales del Núcleo Base Circonio para Reactores Nucleares de Potencia", Informe Técnico CNEA DD-ATN40MF-001 (2009).
- [5] J. R. Santisteban, M. A. V. Álvarez, F. Malamud, P. Vizcaíno, and W. Kockelmann, "Characterization of Zr-based nuclear components by TOF neutron diffraction," *Neutron News*, vol. 25, no. 4, pp. 44–47, Oct. 2014.
- [6] U. F. Kocks, *Texture and Anisotropy: Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Materials Properties*. Cambridge University Press, 2000.
- [7] S. Siano, L. Bartoli, J. R. Santisteban, W. Kockelmann, M. R. Daymond, M. Miccio, and G. De Marinis, "Non-destructive investigation of bronze artefacts from the Marches National Museum of archaeology using neutron diffraction*," *Archaeometry*, vol. 48, no. 1, pp. 77–96, 2006.
- [8] R. van Langh, L. Bartoli, J. Santisteban, and D. Visser, "Casting technology of Renaissance bronze statuettes: the use of TOF-neutron diffraction for studying afterwork of Renaissance casting techniques," *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 26, no. 5, pp. 892–898, May 2011.
- [9] M. E. Fitzpatrick and A. Lodini, *Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation*. CRC Press, 2003.
- [10] M. T. Hutchings, P. J. Withers, T. M. Holden, and T. Lorentzen, *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction*. CRC Press, 2005.
- [11] W. Reimers, A. R. Pyzalla, A. Schreyer, and H. Clemens, *Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science: From Fundamentals to Material and Component Characterization*. Wiley, 2008.
- [12] *Development and Applications of Residual Stress Measurements Using Neutron Beams*, IAEA technical Report Series 477, Vienna, 2014.
- [13] M. Hofmann, R. Schneider, G. A. Seidl, J. Rebelo-Kornmeier, R. C. Wimpory, U. Garbe, and H.-G. Brokmeier, "The new materials science diffractometer STRESS-SPEC at FRM-II," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 385–386, Part 2, pp. 1035–1037, Nov. 2006.
- [14] M. J. Abbate, Remez, L. A., Lolich, J. V., and Volkis, J. E., "Facilidad para la Medición de Espectros de Neutrones por el Método de Tiempo de Vuelo," Informe Técnico CNEA 369, 1974.
- [15] J. Marín, F. Sanchez, H. Blaumann, "Rediseño construcción y caracterización de la nueva instalación de neutrografía del RA-6," *Revista CNEA Nro 49/50* (2013) pp 5-10.
- [16] F. A. Sanchez and J. R. Santisteban, "Diseño conceptual de la instalación experimental para difracción de neutrones del RA-6," Informe Técnico CNEA IT-4301-012-14, 2014.

Trabajo presentado en la XLI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Buenos Aires, 1 al 5 de diciembre de 2014