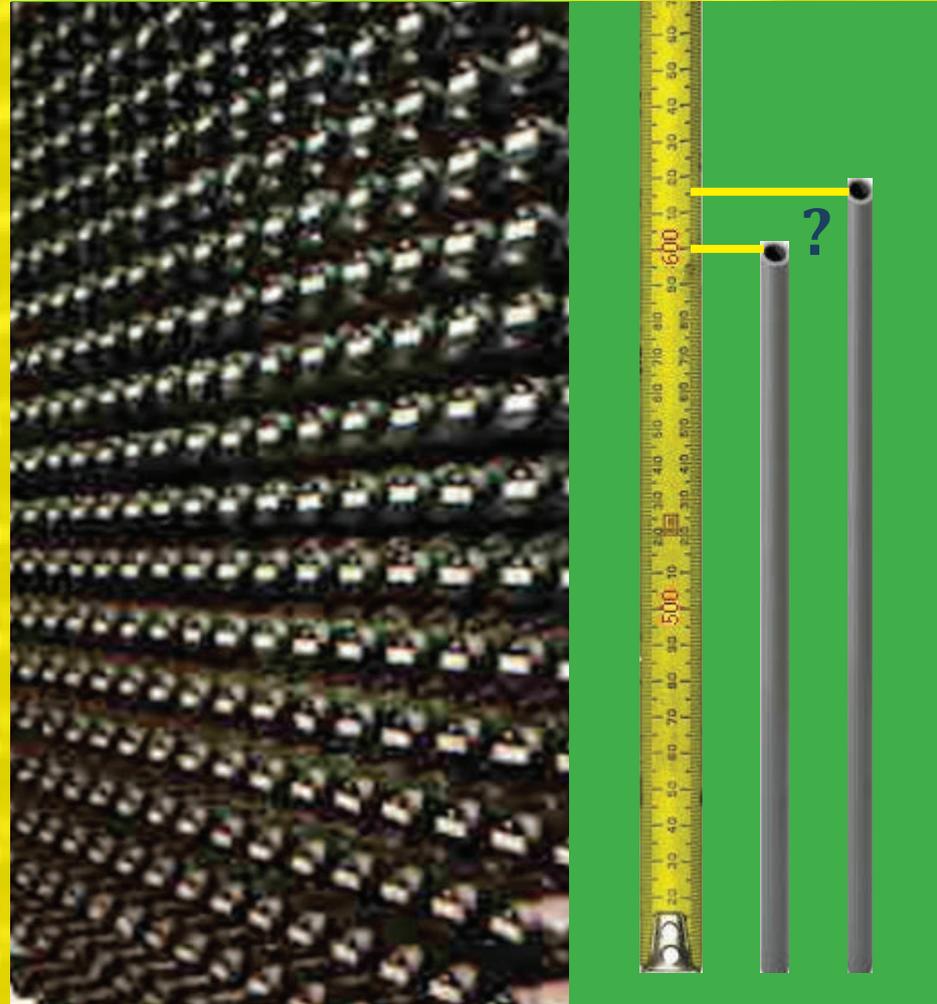


# ¿CRECEN ALGUNOS TUBOS METÁLICOS? Una aventura en los reactores nucleares



Alicia Sarce





# ¿CRECEN ALGUNOS TUBOS METÁLICOS?

Una aventura en los reactores nucleares

**Estamos acostumbrados a ver crecer a los niños y cachorros, a las plantas, a los hongos.... Pero seguramente se han sorprendido al leer el título del libro. Pero sí, también algunos tubos metálicos crecen a pesar de no tener vida biológica. No cambian su peso, pero cambian de tamaño, especialmente aumentan su longitud, sin que se les apliquen fuerzas. Pero no todos los tubos metálicos lo hacen, por eso está la palabra algunos en el título. En este libro los conoceremos y, además, descubriremos el porqué de este cambio. El camino a recorrer no es corto, pero no es difícil!**

Alicia Sarce

**Alicia Sarce**, Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad de Buenos Aires.

Actualmente es Investigadora Consulta de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Es Miembro del Consejo Académico del Instituto Sabato (Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) – CNEA). Es también Secretaria del Colegiado Directivo de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias y Socio Honorario de la Asociación Argentina de Materiales (SAM).

Sus temas de investigación y docencia se centraron en áreas de la Ciencia de Materiales: Transformaciones de fases y Evolución de la microestructura de aleaciones de circonio sometidas a la irradiación con neutrones en los reactores nucleares.



Sarce, Alicia

¿Crecen algunos tubos metálicos? : una aventura en los reactores nucleares / Alicia Sarce. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, 2017.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-28123-7-9

1. Energía. 2. Central Nuclear. 3. Metales. I. Título.

CDD 333.79

Ficha de catalogación

¿CRECEN ALGUNOS TUBOS METÁLICOS?

Una aventura en los reactores nucleares.

Alicia Sarce

Diseño: AAPC

Maquetador: Gabriel Gil

Editado en noviembre de 2017 por



Prohibida su reproducción total o parcial sin citar la fuente

ISBN Nº 978-987-28123-7-9

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723

<http://www.aargentinapciencias.org/>

© 2017 ASOCIACIÓN ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS



## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer:*

*a **Juan Carlos Almagro**, por alentar esta presentación y porque leyó una primera versión y luego otras que permitieron ir incorporando sus valiosas sugerencias.*

*A **Juan Roberto de Xammar Oro**, por sus inestimables aportes a la claridad del texto.*

*A **Ana María Monti**, que destinó parte de su ocupado tiempo a la lectura del libro haciéndome muy valiosos comentarios.*

*A **Pablo Vizcaíno**, por su respuesta y colaboración para seleccionar entre los muchos trabajos producidos por su grupo, aquellos representativos que figuran en la bibliografía específica.*

*A **Nidia Basso** que, uniendo a su trayectoria científica su minuciosa labor de edición, permitió llegar a la versión actual del trabajo que se publica.*

*A **Anita Kurcin**, por estar siempre presente.*

## DEDICATORIA

*Dedicado a la*

***Comisión Nacional de Energía Atómica***

***de Argentina***

# ÍNDICE

|  | Pág. |
|--|------|
| Prefacio .....   | 9    |
| CAPÍTULO 1.....  | 11   |
| Una central nuclear .....                                | 11   |
| La fisión nuclear .....                                  | 13   |
| CAPÍTULO 2.....  | 19   |
| La Central Nuclear Embalse.....                          | 19   |
| ¿Para qué están? .....                                   | 23   |
| - Las pastillas de $UO_2$ (el combustible nuclear) ..... | 23   |
| - El refrigerante (agua pesada).....                     | 23   |
| - El moderador (agua pesada).....                        | 23   |
| Epílogo I (o Temas para pensar) .....                    | 25   |
| - Recambio del combustible .....                         | 25   |
| - El refrigerante y la presión.....                      | 25   |
| - Más sobre el tubo de presión.....                      | 25   |
| - Bombardeo de los tubos de presión.....                 | 26   |
| CAPÍTULO 3.....  | 27   |
| Un modelo físico, su presentación.....                   | 27   |
| El circonio .....  | 28   |
| Defectos en los cristales.....                           | 29   |
| - Los defectos puntuales .....                           | 30   |
| - Las dislocaciones .....                                | 31   |

|  |           |
|--|-----------|
| -Los bordes de grano.....  | 35        |
| La irradiación y los defectos puntuales .....  | 38        |
| Epílogo II (o síntesis de lo visto desde el Epílogo I).....                            | 41        |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>   | <b>43</b> |
| Las dislocaciones en el tubo de presión .....  | 43        |
| Las dislocaciones y los defectos puntuales en el tubo de presión .....                 | 44        |
| Las dislocaciones, los defectos puntuales y la irradiación del tubo de presión.....    | 46        |
| Los bordes de grano, los defectos puntuales y la irradiación del tubo de presión ..... | 49        |
| Cálculo del cambio de dimensiones de los tubos de presión .....                        | 52        |
| Epílogo III (o síntesis de lo visto desde el Epílogo II).....                          | 56        |
| Apéndice I. Proceso de fabricación de los tubos de presión.....                        | 58        |
| Apéndice II. Teoría de los procesos de reacción .....                                  | 63        |
| Apéndice III. Atucha I y Atucha II .....   | 67        |
| Apéndice IV. Otros cambios dimensionales.....  | 72        |
| Apéndice V. Tabla Periódica de los Elementos.....                                      | 73        |
| <b>Bibliografía .....</b>  | <b>75</b> |



# PREFACIO

Estamos acostumbrados a ver crecer a los niños y cachorros, a las plantas, a los hongos.... Pero seguramente se han sorprendido al leer el título del libro. Pero sí, también algunos tubos metálicos crecen a pesar de no tener vida biológica. No cambian su peso, pero cambian de tamaño, especialmente aumentan su longitud, sin que se les apliquen fuerzas. Pero no todos los tubos metálicos lo hacen, por eso está la palabra **algunos** en el título. Para que eso ocurra deben estar fabricados con materiales que, junto con el proceso de fabricación, hagan que esos tubos tengan características particulares y, además, deben estar sometidos a condiciones externas también particulares.

Algunos de los tubos metálicos que se encuentran en los reactores de las centrales nucleares en funcionamiento, son ejemplos de tubos que tienen ese particular modo de crecer. Y ese crecimiento debe ser tenido en cuenta en el diseño del reactor: los tubos no deben encontrar obstáculos que traben su crecimiento, lo que podría ocasionar serios problemas.

Es el objetivo de este libro presentar uno de los modelos físicos, el más sencillo, que permite explicar por qué ocurre lo que ocurre, es decir, el porqué de ese crecimiento y que da, además, la posibilidad de predecir el valor de ese cambio de dimensiones. Pero para llegar a esto es necesario recorrer un largo camino porque: en primer lugar es necesario dar un pantallazo de cómo es por dentro y cómo funciona una central nuclear y cómo están ubicados en ella los tubos de los que venimos hablando; en segundo lugar es necesario recordar qué ocurre cuando se fisiónan los átomos y por qué pueden fisiónarse; en tercer lugar, y, tal vez, el mayor desafío para entender ese crecimiento, es necesario conocer el interior de los metales con los cuales están fabricados esos tubos y qué cambios se van produciendo en ellos durante el funcionamiento de la central nuclear.

Estos temas son los que se irán viendo a lo largo del libro. Están agrupados en Capítulos, no porque no estén todos relacionados entre sí, sino para que el lector pueda optar, si está familiarizado con los temas tratados en alguno de ellos, hacer rápidamente su propio orden de lectura.

Al final de cada Capítulo, en un Epílogo, se presenta una síntesis de lo tratado y, finalmente, en los Apéndices se introducen y describen temas que fueron mencionados en páginas anteriores o que me parecen complementos interesantes de señalar, como los que aparecen en los Apéndices III y IV sobre Atucha I y II y sobre otros cambios dimensionales, respectivamente, que agregan nuevos conceptos.

Si bien este libro está escrito con rigurosidad, no da una descripción completa del fenómeno de cambio de forma de tubos presentes en reactores nucleares en funcionamiento y en ausencia de fuerzas y apela, en alguna oportunidad, a la intuición del lector. Esas descripciones detalladas pueden encontrarse, por el contrario, en numerosas publicaciones científicas de las cuales se tomaron algunas de las realizadas en el país para citarlas al final, dentro de la Bibliografía Específica. El resto de la bibliografía, de divulgación y general, presenta documentos que desarrollan temas que complementan y dan apoyo a los tratados aquí. Ojalá, al finalizar la lectura de las páginas que siguen, hayan surgido nuevas preguntas que lleven a consultarla.

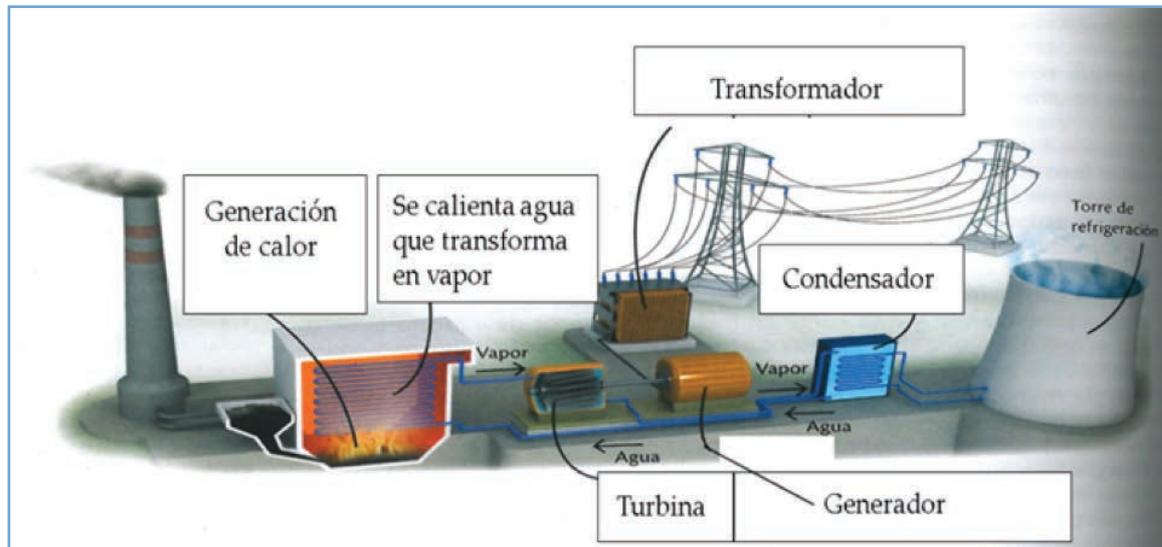
# Capítulo 1

## UNA CENTRAL NUCLEAR

Según el concepto que nos transmiten los especialistas, una central nuclear “es la instalación industrial donde se produce electricidad por medio de la energía resultante de la fisión del núcleo del átomo”<sup>1</sup>. Con esta definición, aparecen dos nuevos conceptos por considerar: como se produce la electricidad en una central nuclear y que es la fisión del núcleo de un átomo, aunque sea en la descripción clásica más elemental.

Antes de entrar en detalles, se debe señalar que las centrales nucleares generan energía eléctrica en una forma similar a cómo lo hacen otros tipos de centrales termoeléctricas (figura 1). En todas se genera calor. Ese calor es transferido a tubos por los que circula agua común que, al calentarse, se transforma en vapor. Ese vapor a presión mueve una turbina que, a su vez, hace mover un alternador

<sup>1</sup> Kamm, Norberto (2010) Serie: hojitas del conocimiento. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable. Comisión Nacional de Energía Atómica, 31 - 32, [www.cab.cnea.gov.ar/ieds](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds)



*Figura 1. Generación de energía eléctrica en una central termoeléctrica.*

acoplado (generador), generándose así energía eléctrica a su salida que, después de pasar por un transformador, está lista para ser transportada por las líneas de alta tensión hasta una subestación de distribución. Los distintos tipos de centrales termoeléctricas difieren en la forma en que se genera el calor. A través de la combustión de materiales fósiles, de gas, de petróleo en las centrales convencionales. En una central nuclear: a través de la fisión de núcleos atómicos. El material en el que se produce la fisión es el combustible nuclear.

Todavía, antes de hablar sobre la fisión nuclear, y para mantener la expectativa, una muy breve referencia a la historia de la generación de electricidad por Centrales Nucleares en el mundo.

La primera central nuclear en el mundo entró en funcionamiento el 26 de junio de 1954. Fue la Central Nuclear de Óbninsk que generaba 5 MW con sólo un 17% de rendimiento térmico. Óbninsk (en ruso: Обнинск) es una ciudad en el centro de la parte europea de la Federación Rusa situada a 108 km al suroeste de Moscú. Fue fundada en 1946 como un poblado para constructores de la primera planta nuclear civil del mundo y obtuvo el estatus de ciudad en 1956. Esa primera central fue desactivada el 29 de abril de 2002 y hoy está convertida en un museo.

Calder Hall, en Inglaterra, fue la primera estación de energía nuclear comercial en el mundo. Se conectó a la red eléctrica el 27 de agosto de 1956 y la planta fue inaugurada oficialmente por la Reina Elizabeth II el 17 de octubre de 1956. Había estado en funcionamiento durante cerca de 47 años cuando fue cerrada, el 31 de marzo de 2003.

Según el informe de la Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA; IAEA por las siglas en inglés) del 8 de julio de 2015 “Examen de la tecnología nuclear 2015”, a fines de 2014 funcionaban en el mundo 438 centrales nucleares y estaban 70 en construcción (46 en Asia, al igual que 32 de los últimos 40 reactores conectados a la red desde 2004) y son treinta países los que utilizan actualmente energía nucleoelectrónica, entre ellos Argentina.

En Argentina hay construidas tres centrales nucleares: Atucha I “Presidente Juan Domingo Perón”<sup>2</sup>, que fue conectada al Sistema Eléctrico Nacional el 19 de marzo de 1974 y comenzó su producción co-

<sup>2</sup> Se la denominó con este nombre por Ley 26.937 sancionada el 14 de mayo de 2014 y promulgada el 29 de mayo de 2014, por haber sido Perón el primer Presidente de la Comisión Nacional de Energía Atómica (cuando, creada el 31 de mayo de 1950, en su primer año de existencia era una Comisión Interministerial) y Presidente de la Nación cuando se inauguró la Central.

mercial el 24 de junio de ese mismo año, convirtiéndose en la primera central nuclear de América Latina; la Central Nuclear Embalse, cronológicamente la segunda central nuclear de nuestro país, entró en servicio el 20 de enero de 1984 y fue en su momento la máquina térmica más grande de Latinoamérica. Se encuentra situada en la costa sur del Embalse del Río Tercero, en la provincia de Córdoba. Recientemente, el 3 de junio de 2014 a las 9:02 horas, la tercera central nuclear de Argentina alcanzó su primera criticidad (puesta en marcha), al concretarse la primera reacción nuclear controlada. Es la Central Nuclear Atucha II “Presidente Dr. Néstor Carlos Kirchner”<sup>3</sup>. Está ubicada al lado de Atucha I, ambas sobre la margen derecha del Río Paraná, en la localidad de Lima, Partido de Zárate, Provincia de Buenos Aires a 115 kilómetros de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Desplazó a Embalse en su liderazgo latinoamericano. Además de generar energía eléctrica, la Central Nuclear Embalse también produce el radioisótopo cobalto 60 para aplicaciones en la medicina, la investigación y la industria, constituyéndose en uno de los principales abastecedores del mercado local y mundial.

## LA FISIÓN NUCLEAR

Átomo, del griego ἄτομον, significa “no divisible”. El filósofo griego Demócrito de Abdera (nació en Abdera en el año 460 a.C. y murió el año 370 a.C.) fue el primero de la historia en dar una definición de átomo: es la parte más pequeña constituyente de la materia. Su teoría atomista consideraba a los átomos eternos, indivisibles, homogéneos, incompresibles e invisibles y que sólo se diferenciaban entre sí por su forma y tamaño. Las propiedades de la materia variaban según el agrupamiento de los átomos.

Mucho después, en 1897, el inglés Joseph John Thompson (1856-1940) anunció el descubrimiento de una partícula cargada negativamente, a la que llamó electrón, y que formaba parte del átomo. Fue capaz de deducir también la relación entre la carga de la partícula ( $e$ ) y su masa ( $m$ ). Según los últimos datos dados en el año 2014 por CODATA (Comité de Información para Ciencia y Tecnología, en inglés: Committee on Data for Science and Technology) la relación  $e / m = -1,758820024 \times 10^{11}$  C/kg, donde C es la unidad de carga, el Culombio, y kg la unidad de masa. El error en la medición es  $\pm 0,000000011 \times 10^{11}$  C/kg.

<sup>3</sup> Se la designó así por Ley 26.936 sancionada y promulgada el 14 y el 29 de mayo de 2014, respectivamente, por haber sido su gobierno el que tomó la decisión de retomar la construcción de la Central en octubre de 2006, luego de que estuviera paralizada desde 1994.

Conociendo la existencia del electrón y a partir de sus trabajos, **Ernest Rutherford**<sup>4</sup> y **Niels Henrik David Bohr**<sup>5</sup> elaboraron el modelo más sencillo que se puede adoptar para describir el átomo: el átomo está formado por un núcleo, alrededor del cual se encuentran los electrones. El núcleo de los átomos es muy pequeño: ocupa una esfera de radio de  $10^{-14}$  m (0,00000000000001 m). En cambio, el átomo entero, incluyendo los electrones, ocupa una esfera de radio  $10^{-10}$  m. Así, si se dibuja un núcleo con un radio de 1 mm, se debería dibujar el átomo completo con un radio de 10.000 mm (10 m!). Sin embargo, aunque el núcleo es muy pequeño, prácticamente todo el peso del átomo se concentra en él.

Generalmente se le acredita a Rutherford el descubrimiento, en el año 1918, de una de las partículas del núcleo: el protón. El descubrimiento de la otra, el neutrón, fue realizado por James Chadwick en 1932. Chadwick (1891-1974), que fue un físico inglés que recibió en 1935 el premio Nobel de Física, presentó su descubrimiento en la prestigiosa revista científica Nature bajo el título "Possible Existence of a Neutron"<sup>6</sup>.

Como va a ser nombrado un número importante de veces, vayan unas pocas palabras dedicadas al elemento uranio. Fue descubierto en 1789 por el químico, mineralogista y farmacéutico Martin Heinrich Klaproth (Alemania, 1743 -1817), quien realizando estudios con un polvo negro obtenido a partir de la pechblenda demostró que contenía un nuevo elemento cuyas propiedades eran distintas a

<sup>4</sup> **Ernest Rutherford:** Conocido también como Lord Rutherford. Físico y químico que nació en Nueva Zelanda en 1871 y murió en 1937. Ganó el premio Nobel de Química en 1908.

<sup>5</sup> **Niels Henrik David Bohr:** Físico nacido en Dinamarca en 1885 que falleció en 1962. Fue alumno de Rutherford y recibió el premio Nobel de Física en 1922.

<sup>6</sup> **Letters to Editor** Nature **129**, 312-312 (27 February 1932) | doi:10.1038/129312a0 Possible Existence of a Neutron.

## Possible Existence of a Neutron

J. CHADWICK

Abstract

IT has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by  $\alpha$ -particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about  $0.3 \text{ (cm.)}^{-1}$ . Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation produced by this beryllium radiation in a vessel with a thin window, that the ionisation increased when matter containing hydrogen was placed in front of the window. The effect appeared to be due to the ejection of protons with velocities up to a maximum of nearly  $3 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$  They suggested that the transference of energy to the proton was by a process similar to the Compton effect, and estimated that the beryllium radiation had a quantum energy of  $50 \times 10^6 \text{ electron volts.}$

las de los ya conocidos. Lo llamó uranio en honor al planeta Urano que había sido el primer planeta descubierto por medio de un telescopio unos pocos años antes (en 1781), por el astrónomo y músico Sir William Herschel (Alemania 1738 - Reino Unido 1822) quien, a su vez, le dio ese nombre en honor a Urano, divinidad griega del cielo<sup>7</sup>. 52 años más tarde, sin embargo, el químico francés Eugène-Melchior Peligot (París, 1811-1890) mostró que el elemento contenido en el polvo negro analizado por Herschel no era un elemento puro sino óxido de uranio natural, principal componente de la pechblenda, y fue él quien consiguió aislar por primera vez el uranio metálico. Más tarde, en 1896, el físico francés Antoine Henri Becquerel (Paris 1852-Le Croisic 1908, premio Nobel 1903) descubrió que el uranio era radiactivo.

El número atómico (número de protones) del uranio es 92 y su núcleo puede contener entre 142 y 146 neutrones; neutro posee 92 electrones. Es de color plateado-grisáceo y se encuentra en muy bajas concentraciones en la naturaleza (unas pocas partes por millón (ppm)) en rocas, tierra, agua y en los seres vivos. Es aproximadamente un 70% más denso que el plomo y ligeramente menos denso que el oro. Sus isótopos<sup>8</sup> más abundantes son el uranio-238 (<sup>238</sup>U) que posee 146 neutrones (de cada gramo de uranio natural el 99,284 % de la masa es uranio-238) y el uranio-235 (<sup>235</sup>U) con 143 neutrones (el 0,711% por cada gramo). Como curiosidad: los datos proporcionados en el año 2009 por la sonda japonesa SELENE<sup>9</sup>, que tenía como objetivo estudiar la luna, permitieron establecer la presencia de uranio en la superficie del satélite de la tierra. El anuncio del descubrimiento se hizo en la 40ª Conferencia Lunar y Planetaria y en la revista *Proceedings of the International Workshop Advances in Cosmic Ray Science*, J. Phys. Soc. Jpn, **78** (2009).

Con estas consideraciones clásicas del átomo es muy fácil definir qué es la fisión nuclear: es la ruptura del núcleo de un átomo. La fisión nuclear ocurre prácticamente en todos los átomos pesados que son aquéllos con número atómico alto, en general mayor de 83, que corresponde al elemento bismuto.

El descubrimiento del neutrón por Chadwick fue fundamental en el campo de la ciencia nuclear para conseguir la fisión nuclear. El neutrón, al no tener carga eléctrica, no es atraído ni repelido por las cargas negativas de los electrones ni por las cargas positivas de los protones de un átomo. Así, un

<sup>7</sup> Según la mitología griega Urano era hijo y esposo de Gea (la Madre Tierra). Urano y Gea fueron padres de Crono (equivalente en la mitología romana a Saturno) que gobernaba el mundo de los dioses y los hombres y devoraba a sus hijos en cuanto nacían para que no lo destronaran. Uno de ellos y nieto de Urano y Gea, Zeus (Júpiter en la mitología romana), consiguió esquivar este destino y finalmente derrocó a su padre para convertirse en el dios supremo. Al planeta Saturno se le otorgó el nombre del padre de Júpiter debido a su posición orbital más lejana y a continuación del planeta Júpiter

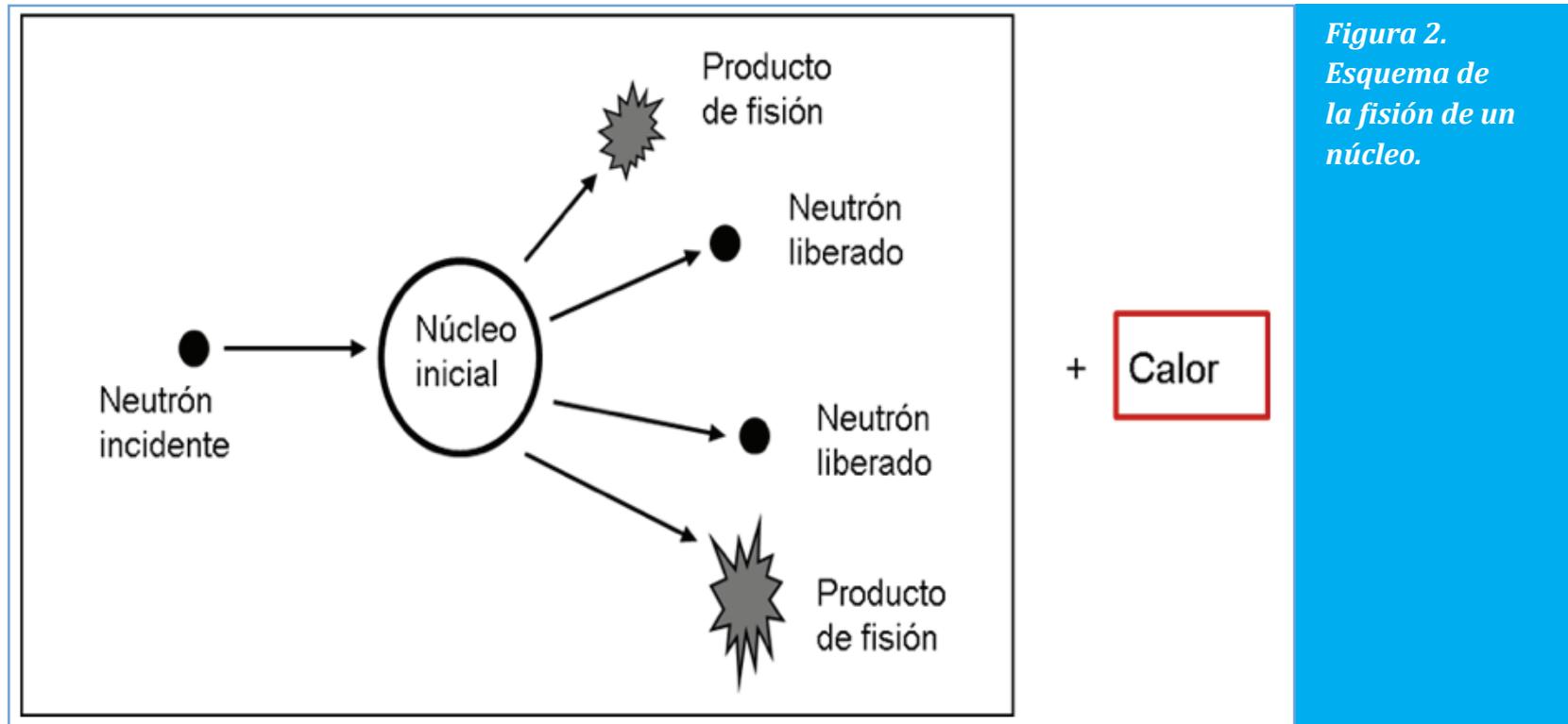
<sup>8</sup> Los átomos de un elemento químico que tienen igual número de protones pero distinto número de neutrones se denominan isótopos, porque ocupan el mismo lugar en la Tabla Periódica (iso = igual;

neutrón que incide sobre un átomo puede impactar directamente en su núcleo, puede ser absorbido por ese núcleo que, finalmente, al tener un neutrón más se vuelve inestable y puede partirse. Es decir, puede fisionarse.

Cuando se produce la fisión por ese choque, el núcleo se divide, generalmente, en dos fragmentos: son los fragmentos o productos de fisión (figura 2). Cada uno de estos fragmentos es un nuevo átomo de masa casi igual a la mitad de la masa original. Además, al fisionarse el átomo, se liberan dos o tres neutrones del núcleo original con una alta energía (neutrones rápidos) y, a la vez, se emiten diferentes radiaciones. Todos estos procesos producen la liberación de una gran cantidad de calor (energía). Pero aquí no terminan las cosas.

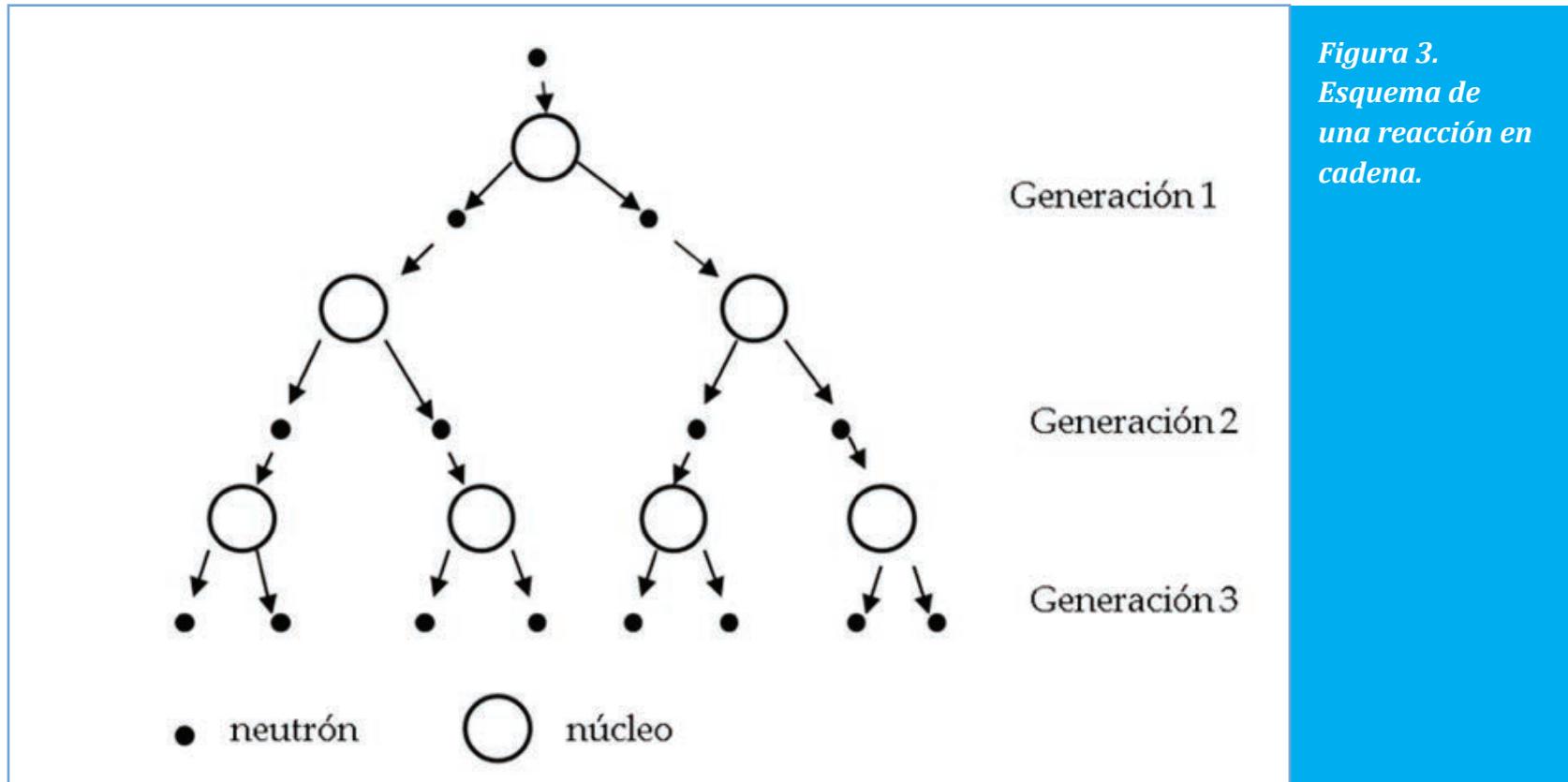
topo = lugar).

<sup>9</sup> <https://es.wikipedia.org/wiki/Selene>



*Figura 2.  
Esquema de  
la fisión de un  
núcleo.*

Esos neutrones que se liberaron en la primera fisión nuclear pueden producir, a su vez, una nueva fisión en otros núcleos. Los neutrones liberados en estas nuevas fisiones, a su vez, pueden producir la liberación de otros neutrones que, nuevamente, pueden producir más fisiones y así sucesivamente. Este proceso que se va desencadenando a partir de una primera fisión se denomina reacción en cadena (figura 3) y en particular se produce, entre otros, en los núcleos de los átomos del isótopo  $^{235}\text{U}$  cuando sobre uno inicial incide un neutrón.



*Figura 3.  
Esquema de  
una reacción en  
cadena.*

Suponiendo que en cada fisión provocada por un neutrón se liberaran dos neutrones más, el número de neutrones liberados se duplicaría en cada generación de fisiones. Así, en 10 generaciones ya se tendrían producidos 1.024 neutrones libres ( $2^{10}$ ) que, a su vez, podrían seguir produciendo nuevos neutrones. Sin embargo, no todos los neutrones que se liberan en una fisión están disponibles para producir una nueva. Algunos se pierden. Si el número de los que se pierden es mayor que el número de los que se producen, es fácil de prever lo que ocurrirá: la reacción en cadena se detiene. Para que, a pesar de que algunos neutrones se pierdan, la reacción en cadena se mantenga, es necesario que haya una cantidad mínima de material capaz de fisionarse. Esa cantidad mínima es llamada masa crítica y depende de las propiedades del material fisionable, de su pureza y de su geometría.

Bueno, habiendo descrito la fisión nuclear relajemos ahora la lectura con un poco de historia sobre el tema.

La fisión nuclear de los átomos fue descubierta en 1938 por los investigadores alemanes Otto Hahn (1879-1968) y Friedrich Wilhelm Strassmann (1902-1980) a partir del trabajo desarrollado por el propio Hahn junto a la física austríaca Lise Meitner (1878-1968). Por este hallazgo Otto Hahn recibió el Premio Nobel de química en 1944. Si bien Meitner formó parte del equipo que descubrió la fisión nuclear no recibió la misma recompensa. Esto es a menudo considerado uno de los ejemplos más evidentes de hallazgos científicos hechos por mujeres y pasados por alto por el comité que otorga el Nobel. Como compensación, se sugirió que el elemento número 109 de la Tabla Periódica (encontrado por accidente en 1982) fuera llamado Meitnerio (Mt) en su homenaje. Pero este nombre recién fue aceptado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por las siglas en inglés) en 1997. Desde 1944 hasta 1997, cuántos años tuvieron que pasar para que fuera reconocida!

## Capítulo 2

### LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE

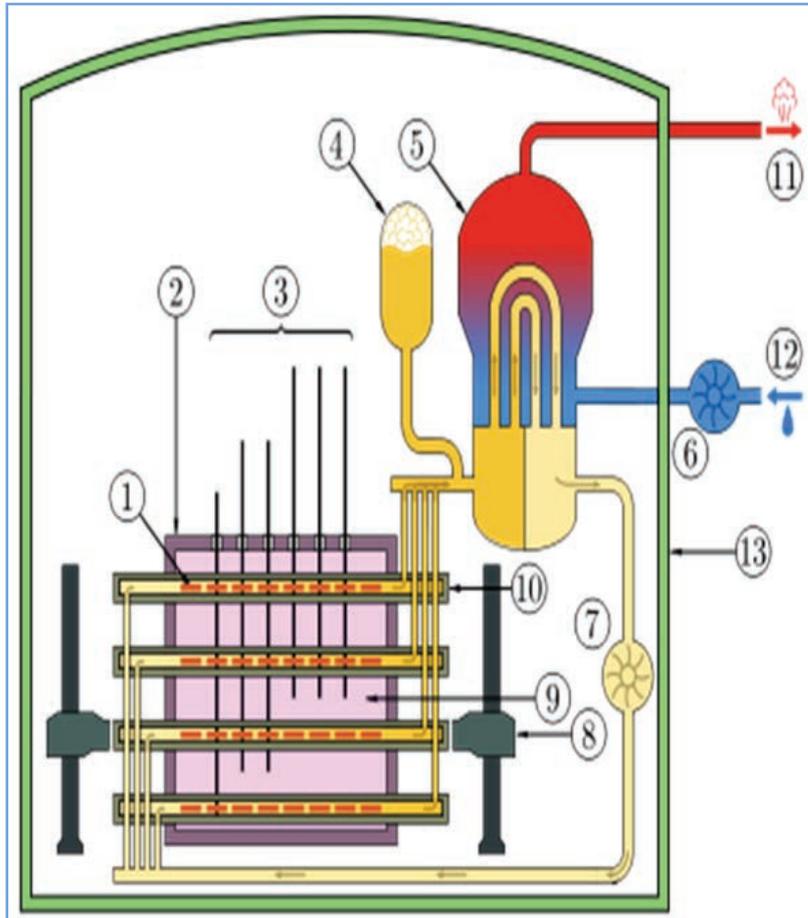
Después de haber recordado cómo se genera electricidad en una central termoeléctrica y de haber hablado de la fisión nuclear, llega el momento de presentar a algunos de los tubos que se encuentran en los reactores de las centrales nucleares que son ejemplos de tubos que crecen. Y qué mejor que mirar en detalle alguna de las centrales nucleares de Argentina. En particular, como el tipo de reactor nuclear (que es la parte más importante de toda central nuclear) de la Central Nuclear Embalse es distinto del tipo de reactor de las Centrales Nucleares Atucha I y II, aquí se considerará sólo en detalle la Central Nuclear Embalse y en el **Apéndice III** se dirán unas pocas palabras sobre Atucha I y II.

Al acercarse a la Central Nuclear Embalse se ve el conjunto de edificios que se muestran en la figura 4. Entre ellos se distingue, claramente, un cilindro con un domo. Este cilindro, de 43,50 m de diámetro y una altura de unos 50 m, encierra las partes fundamentales de la central nuclear.



*Figura 4. Central Nuclear Embalse a orillas del Embalse del Río Tercero.*

Imaginando que fuera posible atravesar con la mirada su pared externa que es de hormigón reforzado de 1,05 m de espesor promedio (señalada por el número 13 en la figura 5, que lo representa) se vería, dentro, el reactor nuclear. Éste es un tanque cilíndrico horizontal de acero inoxidable llamado Calandria (número 2 en la figura 5) de 6 m de largo y un diámetro de unos 7,60 m y que contiene en su interior agua pesada<sup>10</sup> (es el moderador, cuya función se verá más adelante). Este reactor de Embalse es tipo CANDU (sigla de CANada Deuterium Uranium) desarrollado en Canadá y es similar a los reactores de todas las centrales nucleares de ese tipo construidas en el mundo.

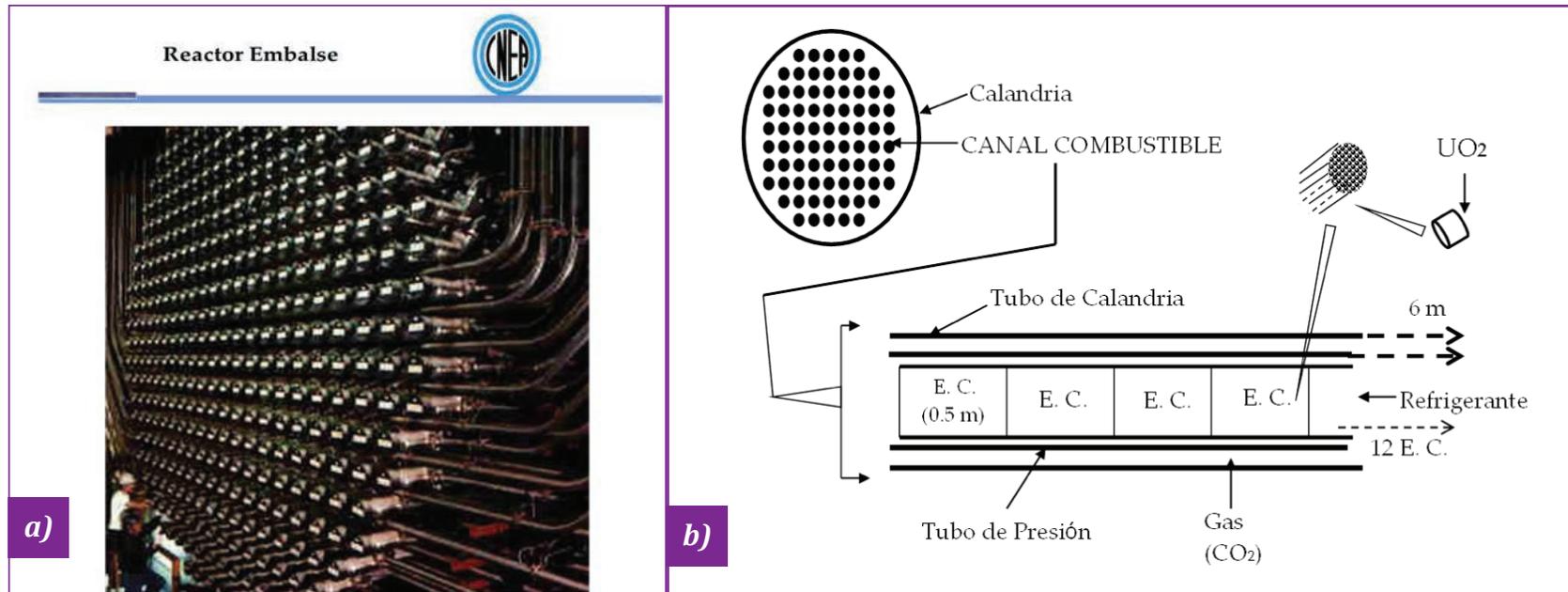


*Figura 5. Vista interior del cilindro en una central del tipo CANDU. 1: Combustible nuclear; 2: Calandria; 3: Barras de control; 4: Depósito de agua pesada; 5: Generador de vapor; 6: Bomba de agua liviana; 7: Bomba de agua pesada; 8: Máquina de recambio del combustible; 9: Moderador; 10: Canal combustible; 11: Vapor que va hacia la turbina; 12: Agua fría que vuelve de la turbina; 13: Edificio externo o isla nuclear de hormigón reforzado. (Imagen obtenida de Wikipedia).*

<sup>10</sup> Agua pesada: la molécula está formada por dos átomos de deuterio (D) y uno de oxígeno (D<sub>2</sub>O). El deuterio es un isótopo del hidrógeno. Mientras que el hidrógeno tiene sólo un protón en su núcleo y un electrón externo, el deuterio tiene en su núcleo un protón y un neutrón y un electrón fuera del núcleo. Las propiedades físicas del agua pesada varían poco respecto a las del agua común. En particular la temperatura de ebullición del agua pesada es de 101,4° C a la presión atmosférica.

La Calandria es atravesada horizontalmente por 380 tubos llamados canales combustibles (número 10 de la figura 5) con la disposición geométrica mostrada en la figura 6a y esquematizada para unos pocos canales en la figura 6b. Cada uno de estos canales está constituido, a su vez, por dos tubos concéntricos (figura 6b): el exterior es llamado Tubo de Calandria y el interior Tubo de Presión, ambos son de seis metros de largo y están separados entre sí por el gas anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) que los aísla térmicamente.

A su vez, dentro de cada tubo de presión se encuentran doce elementos combustibles (E.C. en la figura 6b) de 0,5 m de largo cada uno, ubicados uno a continuación del otro. En los 380 tubos de presión hay en total 4560 elementos combustibles. Por cada tubo de presión circula, además, agua pesada que actúa como líquido refrigerante.



**Figura 6. a) Foto del reactor nuclear de la Central Nuclear Embalse; b) Representación de la ubicación de los canales combustibles en la calandria del reactor. Se identifica un canal combustible formado por los tubos de calandria y de presión. Dentro de éste están los elementos combustibles (E. C.) con el material combustible (pastilla de  $\text{UO}_2$  de aproximadamente 1 cm de diámetro y 1 cm de altura) en su interior. Los diámetros no están en escala.**

Cada elemento combustible está formado por un grupo de 37 tubos de 0,5 m, cada uno de éstos sellado con tapones en sus extremos, que están sujetos entre sí por una estructura metálica (tal como se esquematiza también en la figura 6b), y contienen el combustible nuclear. Este combustible nuclear está compuesto por pastillas cerámicas de óxido de uranio ( $UO_2$ ) de aproximadamente 0,01 m de diámetro y de altura, que se cargan una a continuación de la otra en los tubos antes de ser sellados (quedan ubicadas en forma similar a las pastillas comestibles dentro de su envoltorio, donde este envoltorio representaría el tubo sellado). Los tubos sellados impiden que el refrigerante que circula por el tubo de presión esté en contacto con las pastillas de óxido de uranio.

Como en las descripciones anteriores aparecen muchos nombres es mejor detenerse un poco y, antes de seguir adelante, volver a mirar esos nombres de cada una de las muñecas de esta verdadera muñeca rusa que constituyen las piezas del reactor nuclear.

- La “muñeca” exterior más grande:....Calandria.
- Dentro de la Calandria:.....Moderador y 380 canales combustibles.
- Cada Canal combustible (largo 6 m):..... 2 tubos concéntricos.
- Tubo exterior del Canal combustible (largo 6 m):..Tubo de calandria.
- Tubo interior del Canal combustible (largo 6m):.....Tubo de presión.
- Dentro de cada Tubo de presión:...Refrigerante y 12 elementos combustibles (largo 0,5 m).
- Elemento combustible:..... Grupo de 37 tubos sellados sujetos entre sí, conteniendo el combustible nuclear.
- Combustible nuclear:.....Pastillas de  $UO_2$  (0,01 m de diámetro y altura).

Es, ahora, el momento justo para ver para qué están y cómo colaboran las “piezas” mencionadas, todas necesarias, para generar energía eléctrica.

Pero antes, merece una respuesta la pregunta: ¿cuáles son los tubos, de todos los nombrados, que se estarán mirando cuidadosamente para ver cómo y por qué crecen? Son los **tubos de presión**, los que contienen los elementos combustibles.

## ¿PARA QUÉ ESTÁN?

### - Las pastillas de $\text{UO}_2$ (el combustible nuclear).

Son las “estrellas” del reactor. Contienen los átomos de  $^{235}\text{U}$  que se fisionan cuando absorben un neutrón dando lugar a la producción de la reacción en cadena. Esta reacción en cadena se mantiene controlada a través de las barras de control (número 3 en la figura 5) compuestas de material absorbente de neutrones, permitiendo que el número libre de éstos sea el adecuado.

### - El refrigerante (agua pesada).

Circula de un extremo a otro de cada tubo de presión, pasando entre los elementos combustibles. Su función es la de extraer el calor generado durante las fisiones, manteniendo una temperatura aproximadamente de  $300^\circ\text{C}$ . Por un lado, para evitar que se fundan los combustibles. Por otro, para transferir luego su calor al agua común que se transforma en vapor en el generador de vapor (5 en la figura 5), permitiendo que se complete el ciclo de generación de energía eléctrica. El agua pesada, enfriada al transferir el calor, es reciclada nuevamente al reactor.

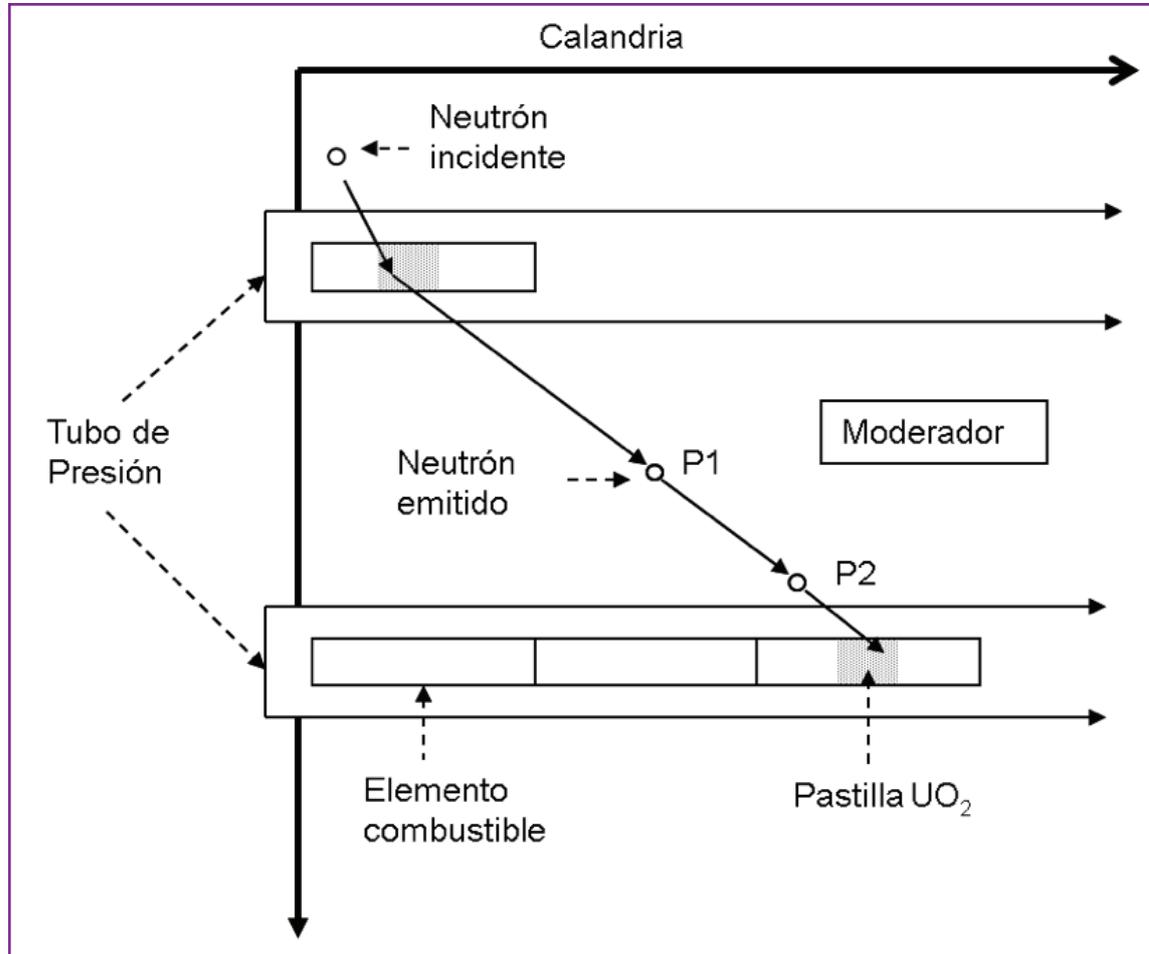
De la misma forma, el vapor de agua transmite su energía calórica a un nuevo circuito por el cual circula el agua común que proviene del lago que se encuentra adyacente a la Central Nuclear Embalse (representado por 12 en la figura 5) y, al condensarse, vuelve fría a los generadores de vapor. El agua pesada del refrigerante, el agua común de los generadores y el agua común del lago circulan por distintos circuitos y no se mezclan entre sí.

### - El moderador (agua pesada).

El moderador, que se encuentra dentro de la calandria, permite disminuir la velocidad de los neutrones rápidos liberados en la fisión de los núcleos atómicos del  $^{235}\text{U}$  (esquema figura 7). Esta disminu-

ción de la velocidad, necesaria para aumentar la eficacia del proceso de fisión y que la reacción en cadena pueda autosostenerse, se consigue por sucesivos choques de los neutrones con las moléculas del agua pesada.

Ambos, refrigerante y moderador, son de agua pesada y como se ve en el esquema de la figura 5, tampoco se mezclan entre sí.



*Figura 7. Esquema de la trayectoria de un neutrón emitido en la fisión de un núcleo de  $^{235}U$  perteneciente a una pastilla de  $UO_2$  ubicada en el tubo de presión superior. La longitud de las flechas indica comparativamente la velocidad del neutrón en las distintas partes de su recorrido dentro del moderador (posiciones P1 y P2) hasta que incide en una pastilla del tubo de presión inferior. La longitud de la flecha asociada al neutrón incidente indica la baja velocidad a la que es absorbido para producir la fisión. Para facilitar la interpretación, en la figura sólo se dibuja parte de dos de los tubos de presión. En el superior se incluye sólo un elemento combustible con una pastilla de  $UO_2$ . En el inferior tres elementos combustibles, uno con una pastilla de  $UO_2$ . Los diámetros no están en escala.*

## EPÍLOGO I (O TEMAS PARA PENSAR).

### - Recambio del combustible.

Si se mira nuevamente la figura 5, pero ahora la leyenda, se encuentra: 8: Máquina de recambio del combustible; y sobre el recambio del combustible no se ha dicho nada. ¿Por qué debe hacerse? ¿Por qué deben cambiarse los elementos combustibles?

Veamos: dentro de cada elemento combustible hay un cierto número de pastillas combustibles y dentro de ellas un cierto número (por supuesto, muy grande) de núcleos de átomos de  $^{235}\text{U}$  que son los que fisionan. Pero ese número de núcleos va disminuyendo a medida que van fisionando. El combustible nuclear se va “gastando”. Es necesario, por esta razón, cambiar los elementos “gastados”. Ese recambio es continuo y se realiza usando la máquina de recambio y cuando el reactor está en funcionamiento (operando).

Indudablemente, las cosas no son estáticas dentro de una central nuclear. Y encima, los tubos crecen!

### - El refrigerante y la presión.

El pie de página 10, que define qué es el agua pesada, termina diciendo: En particular la temperatura de ebullición del agua pesada es de  $101,4^\circ\text{C}$  a la presión atmosférica. Pero...cuando se habló del refrigerante se dijo que su temperatura es de aproximadamente  $300^\circ\text{C}$ . Y, entonces ¿el agua pesada está en ebullición dentro del tubo de presión? No! Para que no entre en ebullición es que se aumenta la presión a la que se encuentra dentro del tubo a 114 atmósferas; seguro que a esta presión la temperatura de ebullición es mayor de  $300^\circ\text{C}$ .

### - Más sobre el tubo de presión.

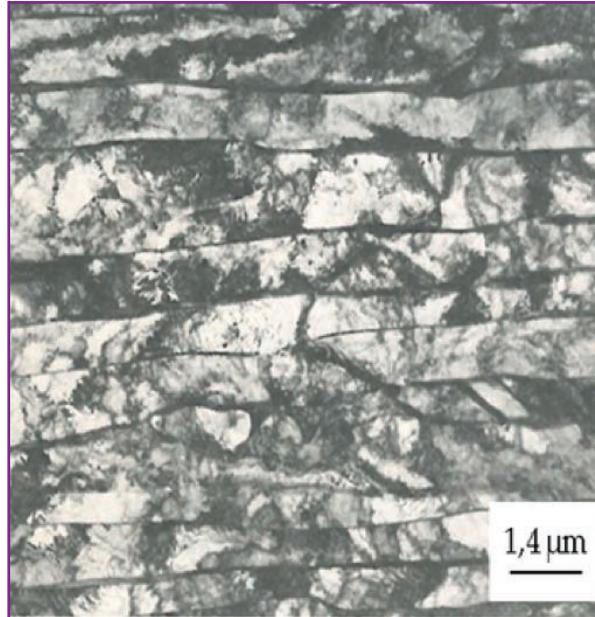
Muchas veces se ha nombrado al tubo de presión, por lo que es ya un viejo conocido. Pero aún no está todo dicho sobre el tubo de presión! Y, además, con lo dicho no se puede explicar por qué los tubos de presión crecen. Es, entonces, necesario seguir mirándolos.

Es, como su nombre lo indica, un tubo. Tiene una longitud de seis metros, por él circula el agua pesada del refrigerante y está sometido a alta presión. Esto ya fue dicho, simplemente se recuerda, pero ahora se agrega: está fabricado con una aleación de circonio (Zr), material que se considerará en detalle en el Capítulo siguiente. La aleación es de circonio y niobio (Nb) con el 97,5% de átomos de circonio y el 2,5% de átomos de niobio (Zr-2,5%Nb) y el tubo tiene un diámetro externo de  $112 \times 10^{-3}$  m (112 mm) y un espesor de unos  $4 \times 10^{-3}$  m (4 mm). Observado en un microscopio electrónico de transmisión presenta el aspecto mostrado en la figura 8, que será descrito más adelante.

#### - Bombardeo de los tubos de presión.

Ya que se ha presentado totalmente al tubo de presión, puede aprovecharse ahora un poco más el esquema de la figura 7 para seguir nuevamente la trayectoria del neutrón emitido en la fisión del  $^{235}\text{U}$  de una pastilla combustible. Se ve que en su pasaje hacia el moderador, y yendo a una alta velocidad, atraviesa la pared del tubo de presión superior pudiendo, en particular, chocar a un átomo de circonio. Pero el efecto de este choque no es la fisión de ese átomo. Un neutrón que atraviesa a alta velocidad un tubo de presión y choca con un átomo de circonio puede arrancarlo de la posición en la que se encuentra y, como consecuencia, crear defectos en el material. Y como esto es esencial para entender por qué crece el tubo de presión, se debe mirar el fenómeno con todo cuidado. Y entrar, porque es indispensable, en el fascinante mundo del interior de los metales.

**Fin del Epílogo I.**



*Figura 8. Foto de una muestra de un tubo de presión tomada en el microscopio electrónico de transmisión. Pertenece al trabajo "CANDU-PHW pressure tubes: their manufacture, inspection, and properties", B.A. Cheadle, C.E.Coleman and H.Licht. Nuclear Technology, 57, junio 1982.*

## Capítulo 3

### UN MODELO FÍSICO, SU PRESENTACIÓN

Por la metalurgia física y por mediciones realizadas en algunas centrales nucleares del mundo y de Argentina, se conoce que, debido a la irradiación neutrónica, tubos de aleaciones de circonio, en particular los tubos de presión, sufren un alargamiento (crecimiento). Este hecho disparó un gran interés científico por tratar de entender el fenómeno. Ese interés científico fue sobrepasado por un interés tecnológico. Los diseñadores de las centrales comprendieron que ese crecimiento de los tubos era un fenómeno clave a tener en cuenta para asegurar la integridad de la central nuclear. El atascamiento de ellos podría llevar a serios problemas.

Hacer mediciones del alargamiento no es sencillo, porque los tubos están en el núcleo del reactor. Además, no sólo es necesario conocer cuánto crecieron hasta un determinado tiempo de funcionamiento de la central nuclear; es necesario poder predecir cuánto más van a crecer hasta el fin de la vida útil de la central previsto por diseño, para que se establezca el espacio suficiente para que puedan acomodarse libremente. Debe preverse cuánto se van a alargar antes de que se alarguen. Y no hay otra posibilidad, esto debe hacerse a través de modelos que permitan calcular *a priori* ese futuro crecimiento. Uno de los modelos usados propone que: por la irradiación se crean defectos llamados puntuales (intersticiales y vacancias) en la red cristalina del material de los tubos (aleaciones de circonio); defectos extendidos de esa red cristalina (dislocaciones y bordes de grano) atrapan a los defectos puntuales creados por la irradiación; los cambios de dimensiones dependerán del balance entre el número de intersticiales y el número de vacancias atrapados por esos defectos extendidos. Por la importancia que tiene, a partir del punto siguiente comenzará a realizarse el desglose de este modelo para ir introduciendo cada uno de los conceptos involucrados y llegar, al final, a predecir con él los cambios de dimensiones de los tubos de presión.

## EL CIRCONIO.

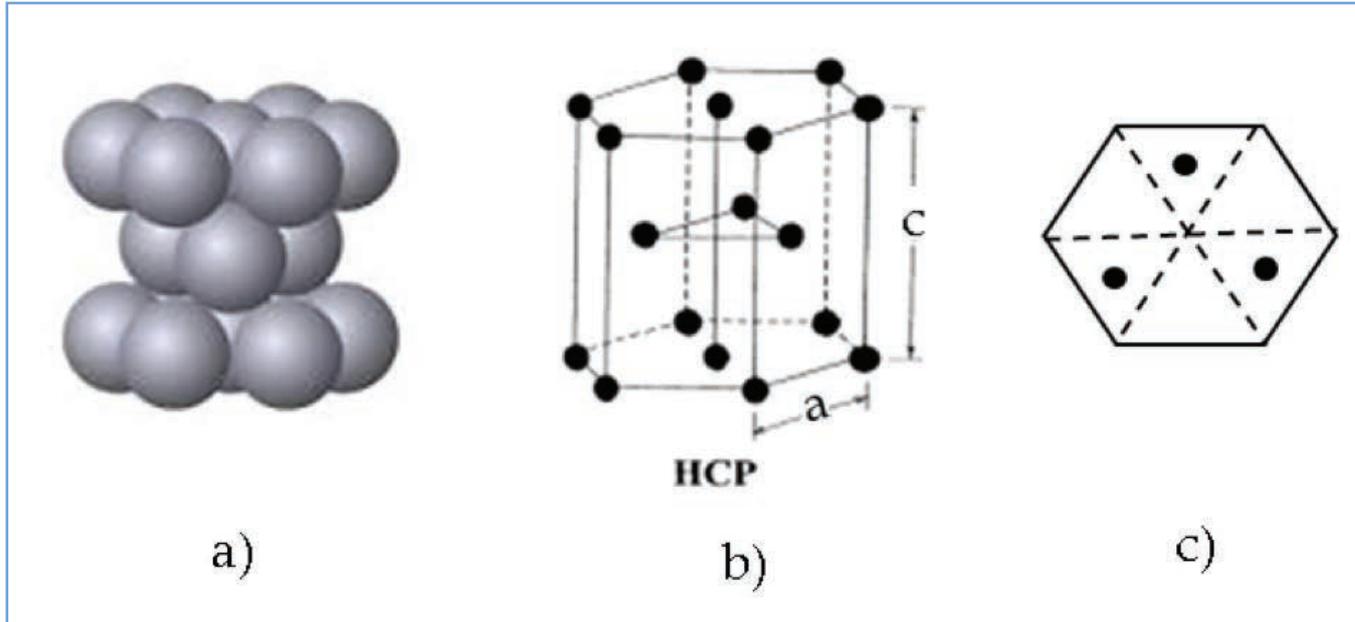
El circonio es un elemento químico de número atómico 40. Su nombre se toma del mineral circón, que es considerado el mineral terrestre más antiguo de los que se conocen, del cual principalmente se obtiene. Circón, a su vez, deriva, probablemente, de la palabra persa “zargun – زوگرز” que significa color dorado. En 1789, en el mismo año en que descubrió el óxido de uranio, Martin Heinrich Klaproth analizó el circón del cual extrajo un óxido (la circonia) descubriendo que contenía un elemento nuevo. En 1824 Jons Jakob Berzelius aisló el circonio en estado impuro; recién en 1914 se pudo caracterizar el metal puro. Éste es de color blanco grisáceo, brillante, de apariencia similar al acero, duro y resistente a la corrosión. Cuando está finamente dividido formando virutas o en forma de polvo, puede arder espontáneamente en contacto con el aire, especialmente a altas temperaturas. Por eso se lo debe almacenar en atmósfera inerte que no contenga oxígeno. Esto explica, además, la primera aplicación práctica del circonio: se utilizó como flash en fotografía.

El circonio es un buen elemento para formar parte de los materiales que constituyen algunas de las componentes de los reactores nucleares porque tiene una baja sección de captura neutrónica<sup>11</sup>. Absorbe pocos neutrones de baja energía cuando es irradiado con estas partículas, lo que permite que queden disponibles para fisiónar los núcleos de <sup>235</sup>U.

El circonio es un metal y los metales son materiales cristalinos, y es por eso que (afortunadamente) se puede usar la geometría para describirlos. En particular, a temperatura ambiente, la distribución de los átomos del circonio en 3D es la que resulta de la repetición en las tres direcciones del espacio de la unidad mostrada en la figura 9a, donde cada átomo de circonio está representado por una esfera. Si sobre estos átomos se dibujaran prismas hexagonales regulares (celdas hexagonales), se encontraría que los átomos de circonio quedan ubicados sobre los vértices de los sucesivos prismas, sobre los centros de sus bases y en los centros de triángulos alternos que se ubican en la sección intermedia del prisma (figuras 9b y 9c). Es por eso que se dice que el cristal de circonio tiene una estructura hexagonal compacta (hcp por sus siglas en inglés: hexagonal close packing), que puede ser descripta por una celda hexagonal. La distancia entre los centros de dos átomos adyacentes sobre la base del

<sup>11</sup> Captura neutrónica: es una interacción en la que un neutrón no produce la fisión sino que es absorbido por el núcleo atómico sobre el que incide, generando un isótopo en un estado excitado. El isótopo activado se des-excita en forma instantánea a través de la emisión de rayos gamma característicos.

prisma (a en la figura 9b) es de 0,32312 nm ( $1 \text{ m} = 10^9 \text{ nm}$ ) y la altura, distancia entre las bases del prisma (c en la figura 9b), de 0,51477 nm.



*Figura 9. a) Representación de la distribución de los átomos en un cristal hexagonal de circonio; b) Representación de la ubicación de los átomos de circonio (●) sobre un prisma hexagonal (celda hexagonal); c) Representación de la ubicación de los átomos de circonio (●) en la sección intermedia.*

## DEFECTOS EN LOS CRISTALES.

Los átomos dentro de los cristales, y no se está hablando sólo del circonio, están distribuidos con regularidad geométrica. Sin embargo, cuando se forman los cristales reales se producen algunas irregularidades dentro de esa regularidad geométrica. Esas irregularidades son defectos en los cristales

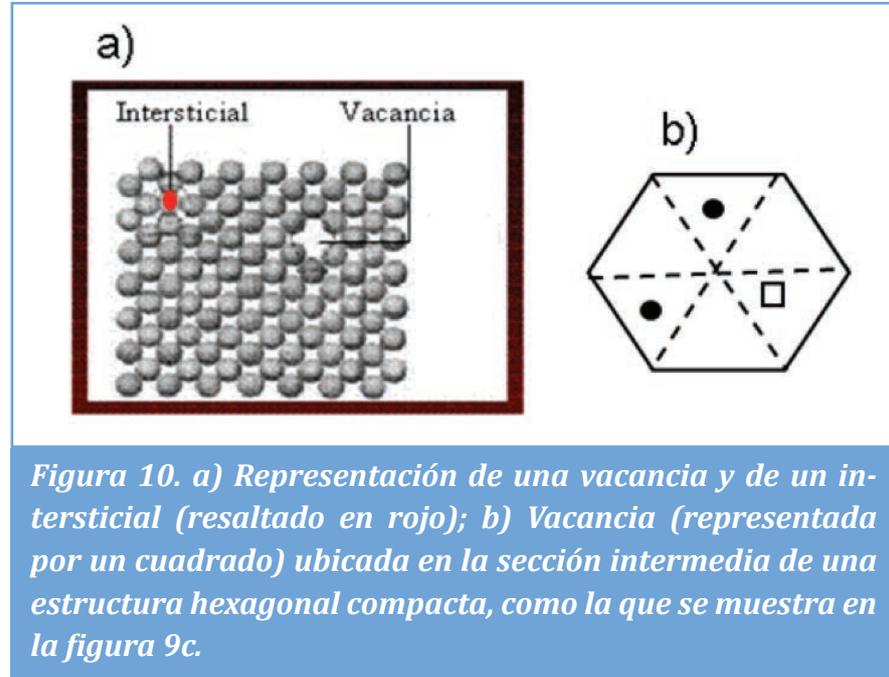
y estos defectos juegan un papel decisivo en el comportamiento de los materiales, en particular en el cambio de dimensiones de los tubos de presión de un reactor en operación.

### -Los defectos puntuales.

Los defectos más simples de describir son los llamados defectos puntuales, debido a que su efecto se reduce a una zona muy pequeña alrededor de un punto. Entre ellos se encuentran las vacancias y los intersticiales. ¿Qué es una vacancia? Es la ausencia de un átomo en la estructura cristalina (figura 10a). En general su posición se indica por un pequeño cuadrado (como el que se muestra en la figura 10b).

Y ¿qué es un intersticial? La descripción también es muy simple: es un átomo ubicado fuera de su posición normal en la estructura cristalina. También está representado en la figura 10a. Cada metal tiene una concentración de vacancias y de intersticiales de equilibrio, que depende de la temperatura a la que se encuentra.

Tanto los intersticiales como las vacancias pueden moverse (difundir) en la estructura cristalina. ¿Cómo es eso? No es difícil de ver con la ayuda de las figuras 11. Un átomo vecino a una vacancia (el átomo inicialmente en la posición A y la vacancia en la posición B, en la figura 11a) que tenga la suficiente energía para pasar entre los átomos 1 y 2 a quienes debe desplazar durante un breve tiempo hacia arriba y hacia abajo, respectivamente (figura 11c), puede intercambiar posiciones con la vacancia ubicándose en B (figura 11b). Si el átomo se ha movido de A a B, la vacancia se ha movido, entonces, de la posición B a la posición A. La facilidad con que una vacancia puede moverse en un



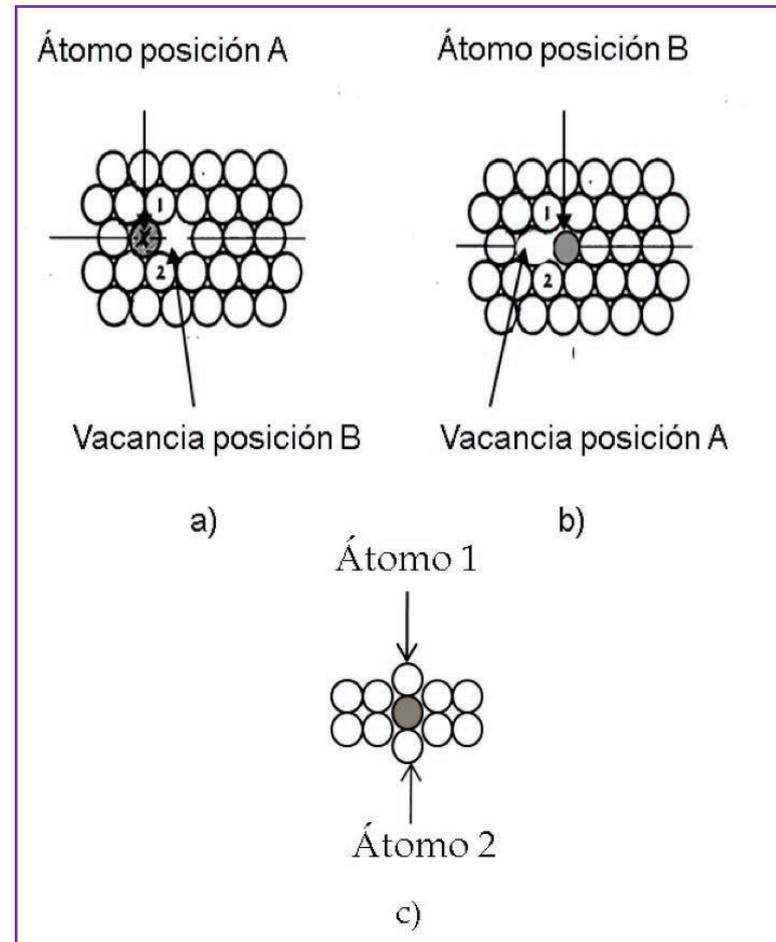
crystal particular está representada por el coeficiente de difusión de la vacancia ( $D_v$ ). Es mayor cuanto más rápido lo haga.

De la misma forma, un intersticial puede moverse también en la estructura cristalina pasando de su posición intersticial inicial a otra posición intersticial, si tiene la suficiente energía para desplazar transitoriamente a los átomos vecinos. La magnitud del coeficiente de difusión del intersticial ( $D_i$ ) es indicativo de cuán rápido se mueve en ese cristal.

Una observación sobre el movimiento de los defectos puntuales en la estructura hexagonal compacta de los metales (en particular del circonio): como la distribución de los átomos es distinta si se la recorre en la dirección  $c$  que en la dirección  $a$  (la red hexagonal compacta es anisotrópica), el movimiento de intersticiales y vacancias en esa red también es anisotrópico, lo que lleva a coeficientes de difusión anisotrópicos. A un intersticial puede resultarle más dificultoso moverse en la dirección  $c$  que en la  $a$  (el coeficiente de difusión en la dirección  $c$  ( $D_{ci}$ ) sería menor que el coeficiente de difusión en la dirección  $a$  ( $D_{ai}$ )), o viceversa ( $D_{ci} > D_{ai}$ ). Y a una vacancia puede resultarle más dificultoso moverse en la dirección  $c$  que en la  $a$  ( $D_{cv} < D_{av}$ ), o viceversa ( $D_{cv} > D_{av}$ ).

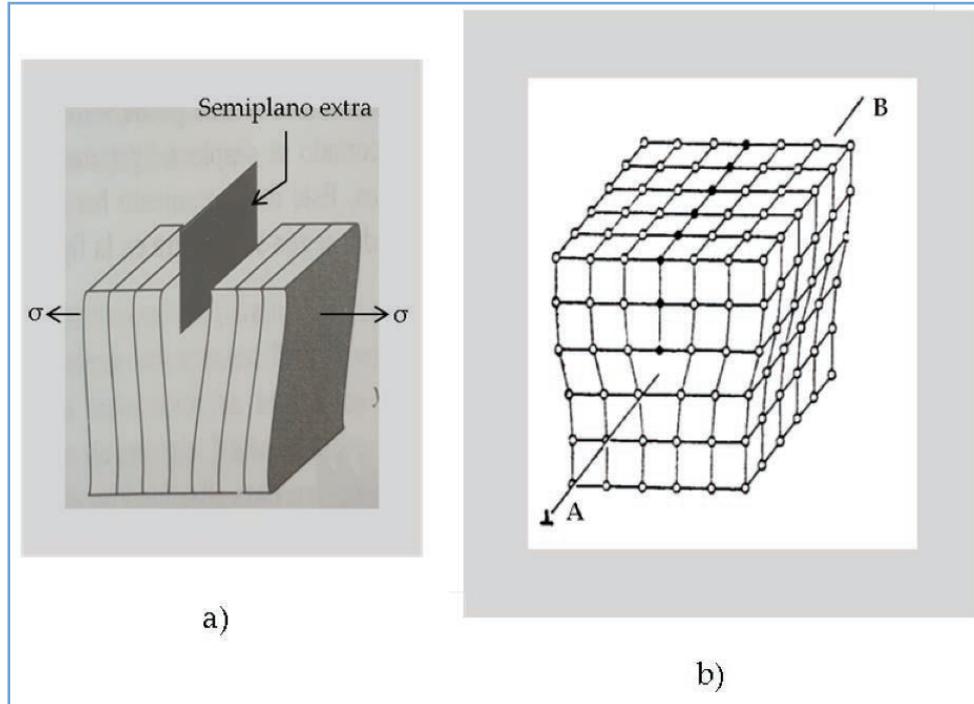
### -Las dislocaciones.

Como se adelantó al hacer la presentación del modelo físico, intersticiales y vacancias no son los únicos defectos en los cristales; existen también los defectos extendidos. Dentro de éstos se describirá a las dislocaciones de borde que luego, a lo largo del texto, se mencionarán simplemente como dislocaciones.



*Figura 11. Movimiento de una vacancia de la posición B a la posición A dentro de un cristal (representación 2D). a) Posición inicial del átomo y la vacancia; b) Posición final del átomo y la vacancia; c) Posición intermedia de los átomos durante el pasaje de una posición a otra.*

¿Cómo se define una dislocación de borde? Como el borde de un semiplano extra de átomos ubicado dentro del cristal. Pero como es más difícil definir una dislocación de borde que visualizarla, se propone recurrir a las figuras 12. En 12a se esquematiza cómo puede ser formada una dislocación de borde: haciendo un corte vertical en un cristal perfecto, separando las superficies del plano de corte aplicando dos tensiones ( $\sigma$ ) perpendiculares a este plano, insertando un semiplano de átomos y quitando luego las tensiones. El cristal con el semiplano extra



**Figura 12. Creación de una dislocación de borde. a) Esquema de las tensiones ( $\sigma$ ) normales a un plano de corte realizado en un cristal perfecto y un semiplano extra de átomos. b) Representación del cristal con el semiplano extra de átomos introducido en el corte abierto. El borde de este semiplano extra, ubicado sobre la línea AB, es la dislocación de borde.  $\perp$  es el símbolo con el que se la identifica.**

con el semiplano extra muestra en la figura 12b; la línea AB dibujada en el borde del semiplano extra representa la dislocación y  $\perp$  es el símbolo con el que se la identifica.

La existencia de las dislocaciones fue postulada teóricamente en 1934, en forma independiente, por George Imgram Taylor<sup>12</sup>, Michael Polanyi<sup>13</sup> y Egon Orowan<sup>14</sup> quienes, para explicar las diferencias entre los valores teóricos y los valores experimentales de las fuerzas nece-

<sup>12</sup> George Imgram Taylor (Londres, 1886-1975). Fue profesor de investigación en Cambridge (UK) y autor de trabajos importantes en el campo de la mecánica de fluidos y de sólidos.

<sup>13</sup> Michael Polanyi (1891-1976). Nació en Hungría. Doctor en Medicina y Química-Física, realizó investigaciones en Berlín, Alemania y fue profesor en Manchester (UK), primero de Química-Física y finalmente de Ciencias Sociales.

<sup>14</sup> Egon Orowan (1902-1989). Nació en Hungría. Dr. en Física, fue profesor en Birmingham y Cambridge (UK) y en el Massachusetts Institute of Technology (USA), donde fue profesor emérito. Murió en Cambridge, Massachusetts, después de una corta enfermedad.

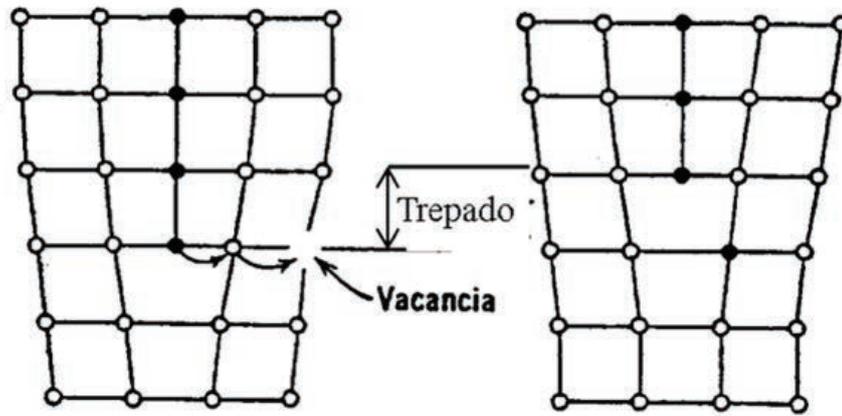
sarias para deformar los metales, comenzaron a pensar en la existencia de ciertos defectos en sus redes cristalinas. Los defectos propuestos fueron las dislocaciones. Recién pudieron ser vistas años después, cuando se desarrollaron los microscopios electrónicos de transmisión.

La cantidad de dislocaciones en un material se mide por su densidad: longitud total de las dislocaciones (m) en un volumen de  $1 \text{ m}^3$  ( $\text{m}/\text{m}^3$  o  $\text{m}^{-2}$ ).

Ahora, y una vez presentadas las dislocaciones de borde, se puede mencionar que, al igual que los defectos puntuales, pueden moverse en la red cristalina en la que están presentes.

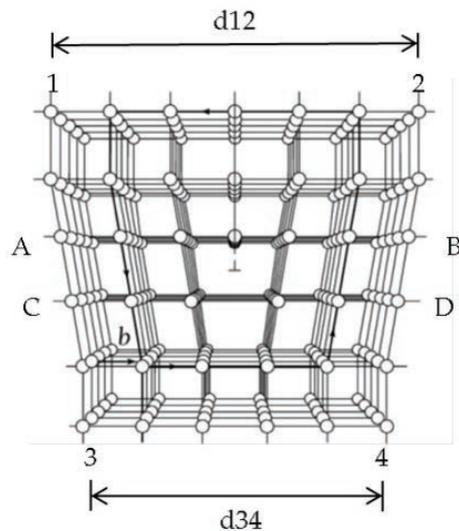
Uno de los movimientos posibles es el trepado<sup>15</sup>. ¿Cómo puede producirse este trepado? Tampoco es difícil de explicar mirando las figuras 13a y 13b, en las cuales sólo se presenta el plano del frente de un cristal con el semiplano extra. Vacancias que se encuentran en sitios próximos a una dislocación pueden, individualmente, difundir hacia ella intercambiando posiciones con los sucesivos átomos adyacentes e intercambiar, finalmente, posiciones con los átomos ubicados en la última fila del semiplano extra. Por efecto de este intercambio la dislocación pasa a estar ubicada en el plano inmediato superior al inicial; esto es, ni más ni menos, el trepado hacia arriba de la dislocación. Si fueran intersticiales que se encuentran próximos a la dislocación los que se movieran y se ubicaran al final del semiplano extra, la dislocación treparía hacia abajo.

<sup>15</sup> Además de trepar, las dislocaciones pueden deslizarse en los cristales, moviéndose sobre un plano. Este movimiento no se considera en este libro porque no contribuye al crecimiento que se analiza.



a)

b)



c)

Figura 13. a) y b) Trepado de una dislocación hacia un plano superior (en 2D). a) La vacancia ubicada inicialmente en la posición indicada salta hacia la izquierda y ocupa la posición del átomo contiguo (ese átomo salta, como está indicado por la flecha, a la posición inicial de la vacancia). Finalmente la vacancia intercambia su lugar con un átomo del borde del semiplano extra. b) La dislocación pasa al plano superior; c)  $d_{12}$ : distancia entre las filas de átomos ubicadas en la parte del cristal que contiene el semiplano extra.  $d_{34}$ : distancia entre filas equivalentes a las anteriores, ubicadas en la parte del cristal que no contiene el semiplano extra. Se ve que  $d_{12} > d_{34}$ .

Mirando la figura 13c se pueden ver las consecuencias del trepado de una dislocación sobre las dimensiones del cristal en el cual se encuentra. Por un lado, lejos de la dislocación, se ve que la distancia  $d_{12}$  entre filas de átomos en la mitad del cristal que contiene el semiplano extra (filas 1 y 2 en la figura) es mayor que la distancia  $d_{34}$  entre las filas equivalentes en la mitad del cristal que no contiene el semiplano extra (indicadas por 3 y 4). En particular, ya la correspondiente separación sobre el plano AB (ubicado inmediatamente sobre la dislocación) es mayor que la correspondiente separación sobre el plano CD (ubicado inmediatamente debajo). Si la dislocación trepara hacia abajo, esta separación sobre el plano CD aumentaría. Por el contrario, si la dislocación trepara hacia arriba, la correspondiente separación sobre el plano AB disminuiría.

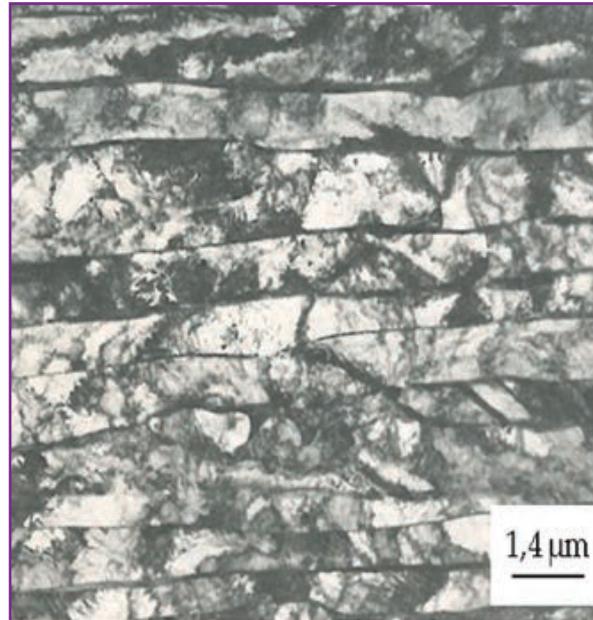
En conclusión: la llegada de vacancias o intersticiales a una dislocación (atrapa de vacancias o intersticiales por la dislocación), que producen su trepado hacia arriba o hacia abajo, lleva a modificar el tamaño del cristal en la dirección perpendicular al semiplano extra.

Con lo que se ha mencionado sobre los defectos en los cristales: la presencia de intersticiales y vacancias y la forma en que pueden moverse y la presencia de dislocaciones de borde y su interacción con los defectos puntuales, ya se ha avanzado en la búsqueda de la explicación de por qué crecen los tubos de presión. Pero aún falta! Entre las cosas que faltan está la descripción de otro defecto extendido: el borde de grano.

### **-Los bordes de grano.**

Hasta aquí se han descrito los materiales usando como herramienta la imaginación. Así, se ha podido hablar de los átomos y su distribución geométrica, tanto en los cristales como en las dislocaciones, y de los intersticiales y de las vacancias. Si bien actualmente existen microscopios especiales que permiten estudiar la distribución de los átomos de una superficie, la mayoría, sean ópticos o electrónicos, sólo permiten ver la microestructura de los materiales. En particular, la microestructura de un pequeño trozo de un tubo de presión, ya presentada (a modo de adelanto) en la figura 8, se muestra nuevamente en la figura 14.

Una descripción rápida de esta microestructura permite identificar zonas alargadas claras, rodeadas por zonas muy finas que aparecen más oscuras y que no serán tenidas en cuenta en lo que sigue. Por los estudios realizados se conoce que estas zonas claras son cristalitas de circonio. A cada uno de los cristalitas se lo llama **grano**. El material del tubo de presión es, por lo tanto, un policristal<sup>16</sup> formado por un conjunto muy grande de granos alargados, ubicados uno a continuación del otro en todo su volumen, como se esquematiza para cuatro de ellos en la figura 15b, donde cada grano real se representa por un prisma. Por el proceso de fabricación del tubo (**Apéndice I**), el mayor tamaño de los granos ( $35 \times 10^{-6}$  m) está en la dirección del eje del tubo (**L**), el menor tamaño ( $0,7 \times 10^{-6}$  m) en el espesor del tubo (en la dirección **R**) y el tamaño intermedio ( $7 \times 10^{-6}$  m) en la dirección tangencial del tubo (**Tg**). Las “viboritas” negras que se ven en la foto dentro de cada grano son dislocaciones, que en el tubo de presión se presentan, nuevamente debido al proceso de fabricación, con una alta densidad ( $\rho_d = 7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ).



*Figura 14. Microestructura de una muestra de un tubo de presión obtenida en un microscopio electrónico de transmisión. El aumento con que fue tomada la foto es  $\times 7.500$ . La foto pertenece al trabajo “CANDU-PHW pressure tubes: their manufacture, inspection, and properties”, B.A. Cheadle, C.E. Coleman and H. Licht. Nuclear Technology, 57, junio 1982.*

<sup>16</sup> Material formado por muchos granos. Monocristal: material formado por un solo grano.

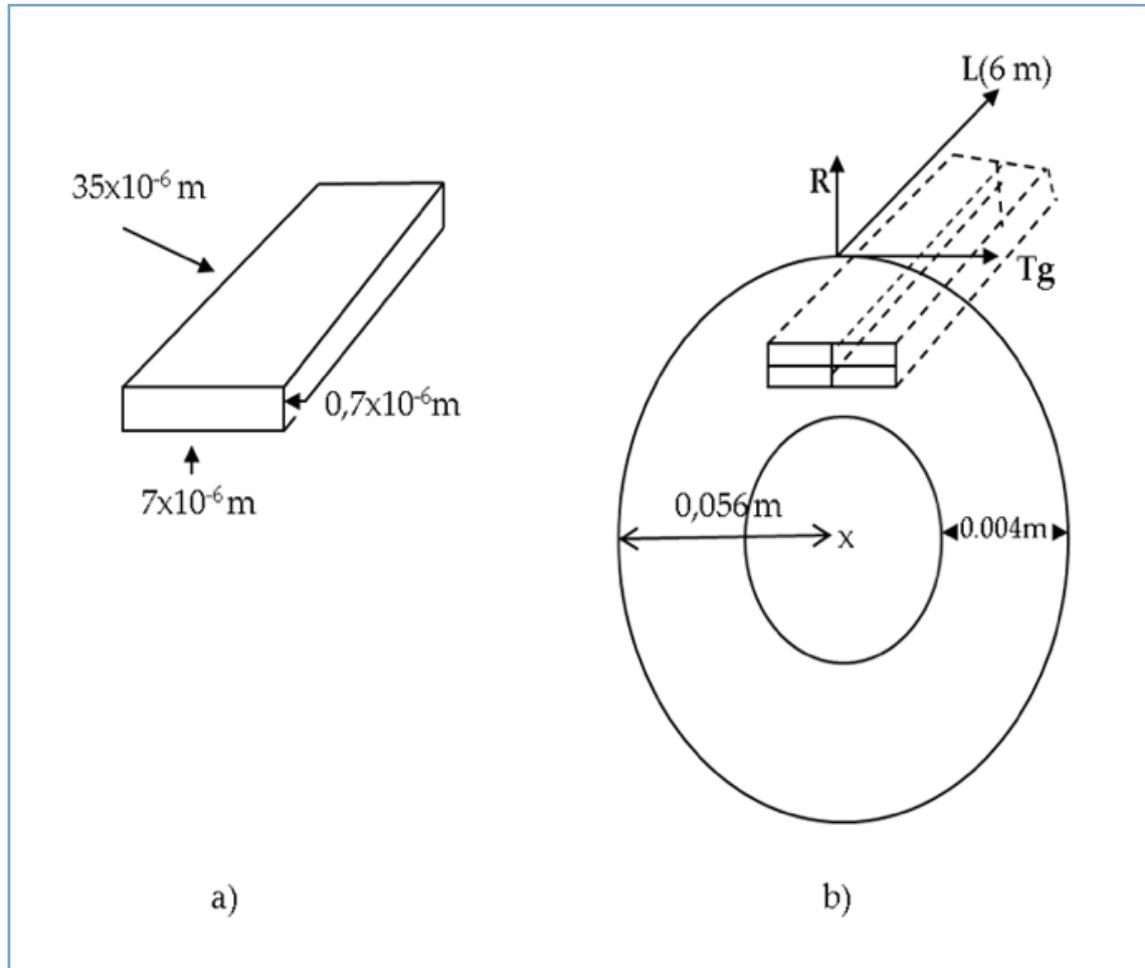
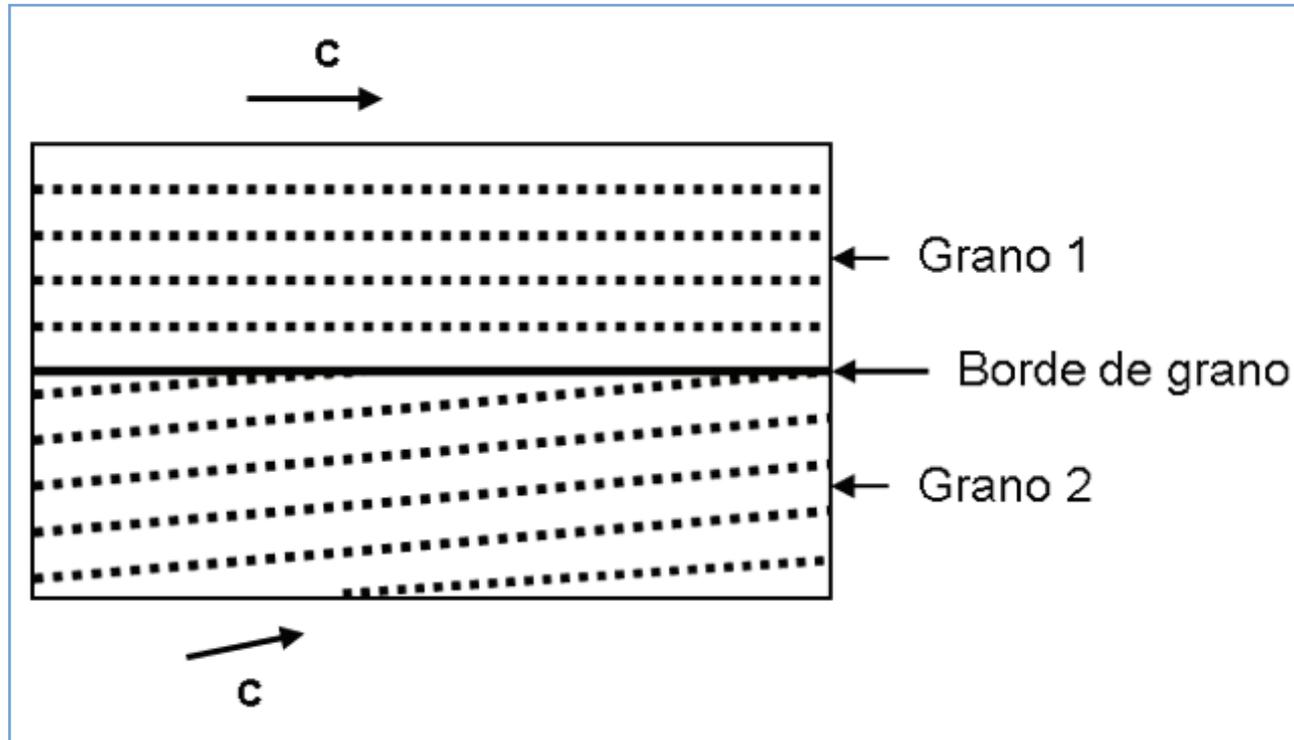


Figura 15. a) Representación en 3D de un grano de circonio de un tubo de presión de Zr-2,5%Nb; b) Esquema de la ubicación de cuatro granos dentro del tubo de presión. Se indican las dimensiones y las direcciones longitudinal ( $L$ ), tangencial ( $Tg$ ) y radial ( $R$ ) del tubo de presión.

Aun cuando todos los granos tienen la misma estructura cristalina (hexagonal compacta), las orientaciones de las celdas dentro de dos granos contiguos son diferentes entre sí. En la figura 16 se representa esto señalando la orientación del eje  $c$  para el caso de dos granos. La superficie de separación entre ellos es un borde de grano y en él los átomos no siguen el orden de los átomos del grano 1 ni de los átomos del grano 2.



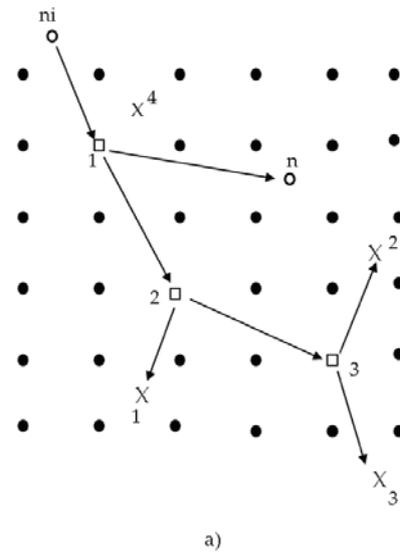
*Figura 16. Representación 2D de dos granos adyacentes separados por el borde de grano. Los puntos dentro de cada grano indicarían la ubicación de sucesivos átomos en la dirección del eje  $c$  de celdas hexagonales para un material de estructura hexagonal. El ángulo entre los ejes da cuenta de la desorientación.*

¿Por qué se describen acá los bordes de grano? No sólo porque son otros defectos de la estructura cristalina sino porque, al igual que las dislocaciones, pueden interactuar con los defectos puntuales y los bordes de grano también los pueden atrapar. Y, al atrapar a los defectos puntuales, pueden también contribuir al crecimiento de los tubos de presión.

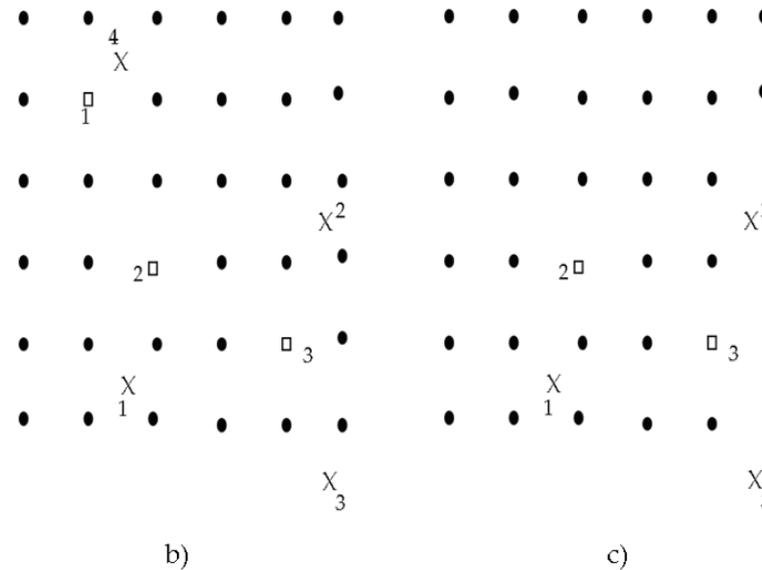
### **LA IRRADIACIÓN Y LOS DEFECTOS PUNTUALES.**

En la parte final del Epílogo I se ha mencionado que un neutrón que choca a alta velocidad con un átomo de circonio puede arrancarlo de la posición en la que se encuentra y, como consecuencia, crear defectos en el material. En primer lugar, y antes de ver estas consecuencias, se debe señalar que

los neutrones rápidos producidos por la fisión de los núcleos de  $^{235}\text{U}$  pueden viajar dentro de los materiales metálicos distancias del orden de los centímetros antes de chocar con un átomo. Por supuesto, estas distancias dependen de la energía del neutrón y del material en el que penetra (por ejemplo, de su densidad). Debido a su espesor, 4 mm, cada neutrón tiene una probabilidad alta de atravesar el tubo de presión sin chocar a ninguno de sus átomos. Pero si el choque ocurre y el neutrón incidente ( $ni$ ), representado por el círculo blanco ( $o$ ) en la figura 17a, arranca el átomo ubicado en el sitio 1 de la red cristalina dejará allí la vacancia ( $\square$ ) 1. El átomo desplazado por el neutrón puede, a su vez y si su energía es suficiente, chocar a otros átomos y producir también otros desplazamientos. En la figura mencionada, el átomo 1 arrancado por el neutrón inicial y antes de terminar su recorrido como intersticial ( $X$ ) 1, choca y arranca al átomo 2, dejando en su lugar la vacancia 2. El átomo 2 (que arranca el átomo 3 y deja en su posición la vacancia 3) queda finalmente como intersticial 2, mientras que el átomo 3 pasa al sitio intersticial 3. Estos desplazamientos atómicos constituyen el comienzo de la llamada cascada de desplazamientos atómicos o cascada de colisiones. A partir de este comienzo, la cascada evoluciona.



*Figura 17. a) Esquema del inicio de la formación de una cascada de colisiones.  $o$ : neutrón [ $n$ ];  $(ni)$ , neutrón incidente;  $\square$ : vacancia;  $X$ : intersticial. b) Ubicación del intersticial 4 próximo a la vacancia 1. c) Recombinación de la vacancia 1 con el intersticial 4, que pasa a ser un átomo de la red.*



La formación de la cascada de colisiones y su evolución posterior se producen en un tiempo cortísimo: sí, en menos de  $10^{-11}$  s. En menos de  $10^{-11}$  s! y el resultado final de esta evolución, que es el que interesa es, fundamentalmente, la formación de igual número de vacancias y de intersticiales por sobre la concentración de equilibrio (como defectos puntuales aislados) y de pares llamados de Frenkel. Éstos, los pares de Frenkel, constituyen otro defecto que se encuentra en algunos cristales y que no es otra cosa que el conjunto de un intersticial y una vacancia que están próximos entre sí. En la figura 17a son ejemplos de pares de Frenkel: la vacancia 2 y el intersticial 1; la vacancia 3 y el intersticial 3 (o el 2). Reciben ese nombre porque fue Yakov Frenkel<sup>17</sup> quien lo sugirió en 1926.

A medida que la irradiación con neutrones continúa se van produciendo nuevas cascadas a lo largo del material y, por lo tanto, más y más defectos puntuales. Cuantos defectos se crean depende, por un lado, del material que se irradia y, por otro, de la cantidad del bombardeo neutrónico. Y una manera de cuantificar este bombardeo es determinando el flujo de neutrones<sup>18</sup> ( $\Phi$ ), es decir, determinando el número de neutrones ( $n$ ) que le llegan en un segundo ( $s$ ) a un centímetro cuadrado ( $\text{cm}^2$ ) de material que, al multiplicarlo por el tiempo  $t$  de irradiación, permite estimar la fluencia neutrónica<sup>19</sup> que recibe.

El flujo que puede recibir un tubo de presión de un reactor nuclear es grande: del orden de  $10^{12}$ – $10^{13}$   $n/\text{cm}^2/\text{s}$  ( $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) o aún mayor. Por ser tantos los neutrones que llegan, aún cuando cada uno tiene una probabilidad alta de atravesar el tubo sin chocar con un átomo de circonio, se originan cascadas de colisiones, con la consecuente creación de defectos, en todo su volumen. La distribución de esos defectos y su naturaleza se describe como daño por radiación.

Pero....si un centímetro cuadrado de un tubo de presión recibe en un segundo unos  $10^{13}$  neutrones debido a las fisiones de los núcleos de  $^{235}\text{U}$ , y los tubos están en el reactor un tiempo largo, el tiempo en que el reactor está funcionando (como mínimo 30 años) cada  $\text{cm}^2$  recibiría unos  $15 \times 10^{21}$  neutrones en todo ese tiempo! .....Entonces, ¿la cantidad de intersticiales, de vacancias y de pares de Frenkel aumenta y aumenta y aumenta? No! Porque:

<sup>17</sup> Yakov Ilich Frenkel nació en Rusia el 10 de febrero de 1894 y murió el 23 de enero de 1952. Fue un destacado físico por sus trabajos en el campo de la física de la materia condensada. Estudió en la universidad de San Petersburgo y se graduó en tres años. Ya en 1912 (un año antes de graduarse) finalizó su primer trabajo sobre el campo magnético terrestre y la electricidad atmosférica. Desde 1921 hasta su muerte trabajó en el Physico-Technical Institute de Rusia. Por sus destacados trabajos científicos fue elegido Miembro Correspondiente de la USSR Academy of Sciences en 1929. Fue profesor visitante en la Universidad de Minnesota en USA. Víctor Frenkel, uno de los dos hijos que tuvo con Sara Isakovna Gordin con quien se casó en 1920, escribió

1- Por efecto del refrigerante la temperatura del tubo de presión es de unos 300° C y a esta temperatura las vacancias y los intersticiales tienen la energía suficiente para difundir en la red del circonio. En particular, algunos átomos desplazados a posiciones intersticiales (por ejemplo el 4 en la figura 17b) pueden saltar a un sitio inmediato ocupado por una vacancia (la 1 en la misma figura, por ejemplo) y vuelven, entonces, a ocupar una posición de equilibrio cristalino, como es mostrado en la figura 17c. Es lo que se conoce como recombinación intersticial-vacancia. Cada vez que se produce una recombinación se pierde un intersticial y una vacancia.

2- Además, intersticiales y vacancias, moviéndose en la red, pueden llegar hasta las dislocaciones presentes en los granos y ser atrapados por ellas, produciendo su trepado como ya fue descrito y también pueden ser atrapados por los bordes de grano.

Así, después de un tiempo se llega a un estado estacionario donde el número de defectos puntuales que se crean es igual al número de los que desaparecen al ser atrapados o por recombinación y la cantidad de intersticiales y de vacancias presentes ya no se modifica.

Dicho esto, y después de dar paso al Epílogo II que es un resumen de los últimos puntos considerados, se comenzará a analizar el tantas veces mencionado crecimiento de los tubos de presión.

## EPÍLOGO II (O SÍNTESIS DE LO VISTO DESDE EL EPÍLOGO I).

A partir del Epílogo I se ha descrito al circonio: es un metal brillante, de color blanco grisáceo, duro, resistente a la corrosión. Se puede agregar que, además, absorbe pocos neutrones, los deja pasar sin mayor dificultad, quedando así disponibles para fisiónar al  $^{235}\text{U}$ . Como todos los metales es cristalino y sus átomos están ordenados para dar una estructura hexagonal compacta. Sin embargo, cuando se forman los cristales reales se producen algunas irregularidades dentro de esa regularidad geométrica. Constituyen los defectos en los cristales. Por el papel que juegan en el crecimiento de los tubos de presión, se han mencionado hasta ahora: a las vacancias y a los intersticiales y sobre ellos se señaló que, cuando un material es irradiado por neutrones rápidos como es el caso de la aleación de circonio en el tubo de presión, el número de intersticiales y vacancias es mucho mayor que el número de

su biografía. (<http://en.wikipedia.org>)

<sup>18</sup> Se define como flujo de neutrones,  $\Phi$ , al producto de la densidad neutrónica  $\delta$  (número de neutrones por unidad de volumen, que se suele medir en  $n/\text{cm}^3$ ) por la velocidad  $v$  de los mismos (cm/s). Para un haz de neutrones de densidad  $\delta$  y velocidad  $v$ , el número de neutrones que llegan por segundo a un centímetro cuadrado de un material es, justamente,  $\delta v$ .

<sup>19</sup> Fluencia neutrónica: es el número de neutrones que, en un determinado intervalo de tiempo, entran en una esfera elemental de volumen centrada en un punto del espacio, dividido por el área del círculo máximo de dicha esfera (se suele medir en  $n/\text{cm}^2$ ).

intersticiales y vacancias en el mismo material sin irradiar, ambos a la misma temperatura. Esto se debe a que si un neutrón de suficiente energía choca con un átomo de circonio puede arrancarlo de su posición dejando allí una vacancia, pudiendo el átomo desplazado terminar su recorrido como intersticial. El resultado de sucesivos choques es la producción de una cascada de desplazamientos atómicos dentro de la red cristalina del circonio. La formación de la cascada y su evolución posterior se producen en menos de  $10^{-11}$  s y el resultado final de esta evolución es, fundamentalmente, la formación de intersticiales y vacancias aislados y de pares de Frenkel estables. Se mencionaron, además, otros defectos: las dislocaciones y los bordes de grano. Vacancias e intersticiales pueden difundir en la red del cristal pasando de una posición a otra; las dislocaciones pueden trepar, hacia arriba o hacia abajo (además se pueden deslizar, movimiento que sólo se ha mencionado en un pie de página). Habiendo analizado estos movimientos se ha visto que, en conjunto e interactuando, los defectos pueden llevar al cambio de dimensiones en una dirección del cristal.

**Fin del Epílogo II.**

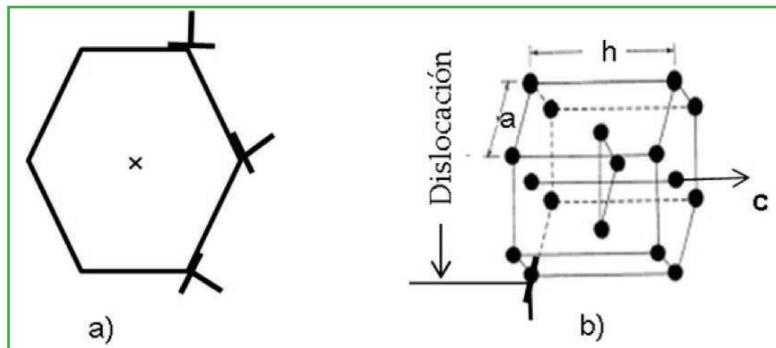
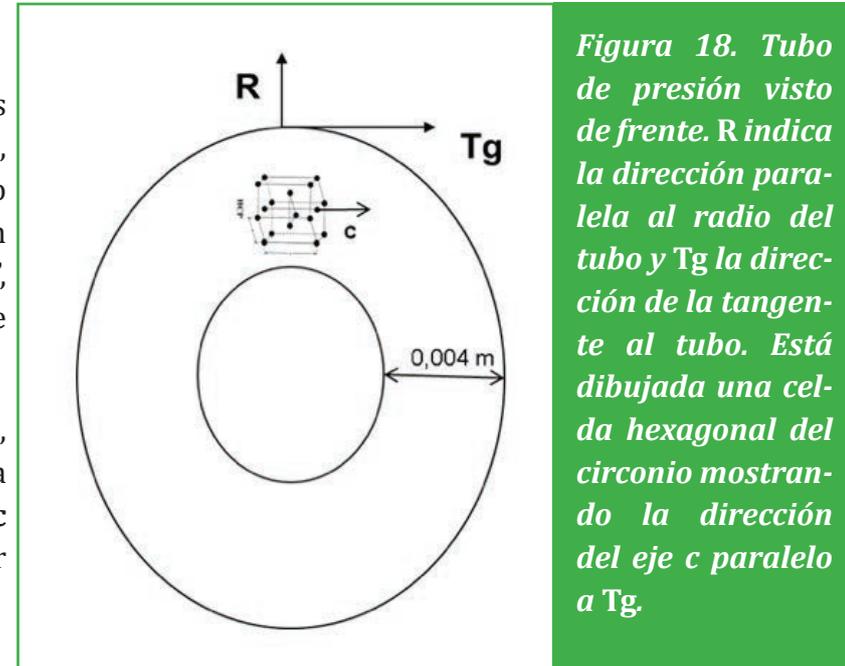


## Capítulo 4

### LAS DISLOCACIONES EN EL TUBO DE PRESIÓN.

Por los procesos que deben realizarse para fabricar los tubos de presión (muy brevemente descritos en el **Apéndice I**), los granos que dan origen a la microestructura del circonio (figura 14), no tienen una orientación cristalina al azar. En la mayoría de ellos las celdas hexagonales están “acostadas”, con la altura de la celda paralela a la dirección de la tangente al tubo, como está mostrado en la figura 18.

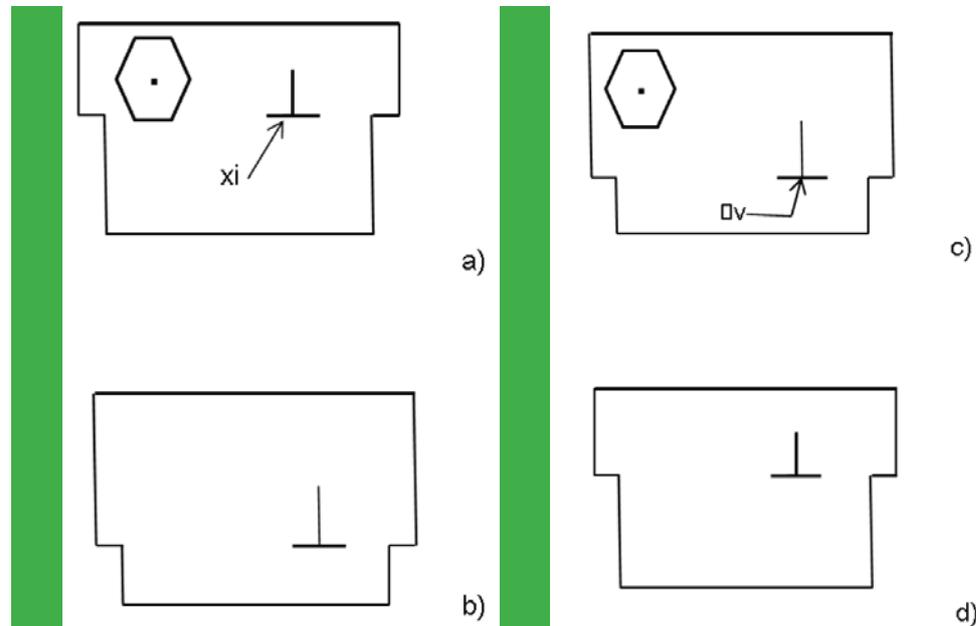
Dentro de los granos, y también por el proceso de fabricación, las dislocaciones tampoco tienen una distribución al azar. La mayoría (aproximadamente  $7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ) son paralelas al eje  $c$  de la celda hexagonal como se muestra en las figuras 19; por esta ubicación se las denomina dislocaciones prismáticas.



Ahora, si esas dislocaciones están ubicadas en la dirección que se mencionó y mayoritariamente las celdas hexagonales están ubicadas dentro del tubo de presión como se mostró en la figura 18, una cosa queda clara: la mayoría de las dislocaciones son paralelas a la dirección **Tg** del tubo. Y se puede ir un poco más allá y considerar no sólo a las dislocaciones en el circonio del tubo de presión sino, también, a los defectos puntuales presentes.

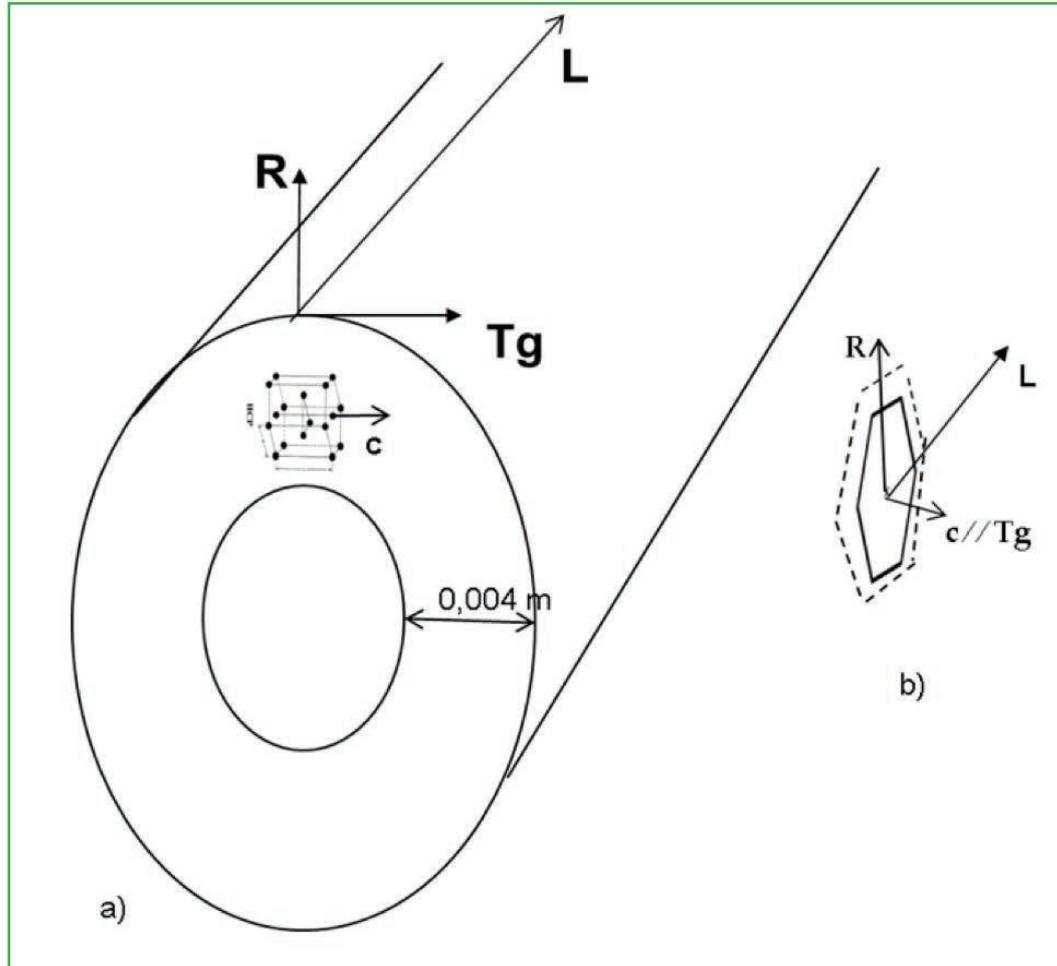
## LAS DISLOCACIONES Y LOS DEFECTOS PUNTUALES EN EL TUBO DE PRESIÓN.

Recordemos lo que es ya conocido mirando las cuatro figuras que forman la figura 20, en las que se ha representado esquemáticamente el contorno de una parte de un cristal y dentro de él se ha supuesto la presencia de una dislocación  $\perp$  y de un intersticial  $\text{xi}$  o de una vacancia  $\square v$ : si una dislocación paralela al eje **c** de la celda como la representada en 20a atrapa intersticiales, se moverá hacia abajo hasta una nueva posición como la mostrada en 20b; como consecuencia, el cristal aumentaría su tamaño en la dirección perpendicular al semiplano extra. Por el contrario, si la dislocación estuviera ubicada como en 20c y atraparía vacancias, treparía hacia arriba y, como consecuencia, disminuiría el tamaño del cristal en esa dirección. Es importante señalar que, en estos movimientos, no se produciría ningún cambio de dimensiones en la dirección del eje **c** de la celda.



*Figura 20. Esquema del trepado de una dislocación paralela al eje **c** de una celda hexagonal, representada por el hexágono de su base: a) y b) cuando recibe intersticiales; c) y d) cuando recibe vacancias. El trepado no produce cambio de tamaño en la dirección del eje **c** de la celda hexagonal.*

Recordando la orientación de la celda hexagonal del circonio en la mayoría de los granos del tubo de presión, figura 21, y habiendo dicho todo lo que se ha dicho en estos últimos párrafos, queda claro: el trepado de las dislocaciones prismáticas debido al atrape de intersticiales o vacancias producirá un aumento o disminución del tamaño del tubo en las direcciones **L** (largo) y **R** (espesor), pero no producirá ninguna variación de tamaño en la dirección **Tg** (diámetro).



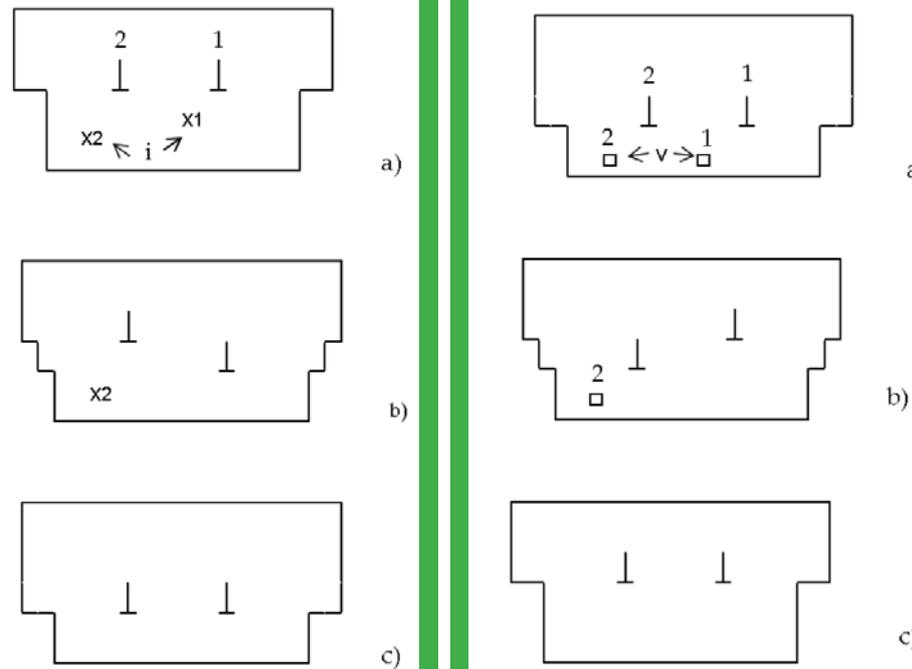
*Figura 21. a) Ubicación mayoritariamente de la celda hexagonal en el tubo de presión; b) Detalle de la ubicación de la base de la celda hexagonal. El hexágono con puntos representa el posible aumento de tamaño de la base por la llegada de intersticiales. No hay cambio en la dirección paralela (//) a c.*

Cuánto cambiará el tubo de presión su tamaño debido a este atrape de los defectos puntuales por las dislocaciones, depende también de factores externos. Entre ellos del flujo de neutrones que recibe.

## LAS DISLOCACIONES, LOS DEFECTOS PUNTUALES Y LA IRRADIACIÓN DEL TUBO DE PRESIÓN.

Plantearemos aquí concretamente: ¿Cuál será el cambio de dimensiones de un tubo de presión que está en un reactor nuclear, siendo irradiado permanentemente por neutrones, debido a la interacción de las dislocaciones con los defectos puntuales que se crean? Tal como se viene tratando el tema y mirando el contorno de un cristal, ahora con dos dislocaciones en su interior, a través de las sucesivas representaciones 2D de las figuras 22 y 23 se ve que depende del balance entre el número de intersticiales y el número de vacancias atrapados por las dislocaciones. Y esta respuesta lleva a nuevas preguntas: ¿cómo se calcula el número de intersticiales que se aproxima a una dislocación y es atrapado

*Figura 22. Representación en 2D de una sección cristalina con dos dislocaciones (1 y 2) y dos intersticiales (X1 y X2). a) contorno del cristal con los defectos en su posición inicial; b) contorno cuando la dislocación 1 atrapó el intersticial X1; c) contorno cuando la dislocación 1 atrapó el intersticial X1 y la dislocación 2 atrapó el intersticial X2.*



*Figura 23. Representación en 2D de una sección cristalina con dos dislocaciones (1 y 2) y dos vacancias (1 y 2). a) Contorno del cristal con los defectos en la posición inicial; b) Contorno cuando la dislocación 1 atrapó la vacancia 1; c) Contorno cuando la dislocación 1 atrapó la vacancia 1 y la dislocación 2 la vacancia 2.*

por ella? ¿Y el número de vacancias? ¿Y de qué depende que lleguen más intersticiales que vacancias o más vacancias que intersticiales a las proximidades de una dislocación?

Más allá de que cada una de las respuestas a las preguntas formuladas tiene su base y justificación de la mano de la llamada **Teoría de los procesos de reacción** que será descrita muy brevemente en el **Apéndice II**, en el contexto de este libro se apelará aquí a la intuición del lector. Aclarado esto, comenzaremos a considerar las preguntas.

- ¿De qué depende el número de intersticiales (vacancias) que se aproximan a una dislocación y son atrapados por ella?

En primer lugar, del número de intersticiales (vacancias) disponible, o concentración de intersticiales  $\langle c_i \rangle$  (concentración de vacancias  $\langle c_v \rangle$ ), que se alcanza en el estado estacionario debido a la irradiación. Cuanto mayor sea, mayor es la posibilidad de que un mayor número de intersticiales (vacancias) llegue a las dislocaciones.

En segundo lugar, de cuán rápido puedan moverse esos intersticiales (vacancias) para aproximarse a las dislocaciones que se mide por el coeficiente de difusión medio<sup>20</sup> de los intersticiales (vacancias)  $\langle D_i \rangle$  ( $\langle D_v \rangle$ ). En principio, si es  $\langle D_i \rangle$  mayor que  $\langle D_v \rangle$ , habrá más posibilidades de que lleguen más intersticiales y viceversa.

Y, en tercer lugar, de la “fuerza” con que las dislocaciones atrapan a los intersticiales o a las vacancias que llegaron hasta su entorno. Esa “fuerza” es la potencia de las dislocaciones para el atrape de intersticiales o vacancias, que se representan con  $k_{di}^2$  y  $k_{dv}^2$ , respectivamente.

Así, el número de intersticiales que llega y es atrapado por las dislocaciones presentes puede considerarse proporcional a la concentración de intersticiales, a su coeficiente de difusión medio y a la potencia de las dislocaciones para el atrape de los intersticiales y, dentro de la teoría de los procesos de reacción, se escribe como el producto:  $k_{di}^2 \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle$ . De la misma forma, el número de vacancias que llega y es atrapado por las dislocaciones presentes es:  $k_{dv}^2 \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle$ .

<sup>20</sup> Esos coeficientes de difusión medios resultan de tomar en cuenta que el coeficiente de difusión de cada intersticial o vacancia en el circonio es anisotrópico (ver **Apéndice II**).

Con una alta densidad de dislocaciones y defectos puntuales presentes, el cristal aumentará o disminuirá su tamaño en la dirección perpendicular al semiplano extra de las dislocaciones y en la unidad de tiempo (u. t.), entonces, según sea el signo del balance:

$$(N^{\circ} \text{ de intersticiales atrapados en la u. t.} - N^{\circ} \text{ de vacancias atrapadas en la u. t.}) \quad (1)$$

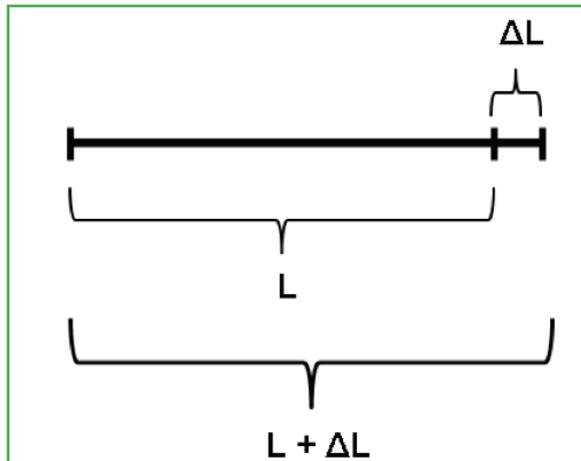
Esto es, si:

$$(k_{di}^2 \langle D_i \rangle \langle C_i \rangle - k_{dv}^2 \langle D_v \rangle \langle C_v \rangle) \quad (2)$$

es mayor o menor que cero. En el primer caso, aumentará su tamaño. En el segundo lo disminuirá.

Antes de continuar, se debe señalar qué significa exactamente y cuantitativamente la diferencia dada por la fórmula (2), que llamaremos  $\epsilon$ , y que fue obtenida aquí intuitivamente: es el cambio relativo de tamaño, en una dada dirección y en la unidad de tiempo, de un cristal con una dada densidad de dislocaciones, debido a la irradiación. Llevado esto al tubo de presión, si su longitud inicial es  $L$  y, como consecuencia de la interacción de los defectos puntuales con las dislocaciones, se alargara una cantidad  $\Delta L$  (ver un esquema en la figura 24), el cambio relativo de la longitud en esa dirección se define como:

$$e = (\Delta L / L) \quad (3)$$



*Figura 24. Representación de la longitud inicial de un tubo (L) y su alargamiento ΔL. El alargamiento relativo es  $e = (\Delta L / L)$ .*

Y  $\dot{\epsilon}$  (con el punto sobre la  $\epsilon$ ) es el cambio relativo que se produciría en una unidad de tiempo en esa dirección **L**.

$$\dot{\epsilon}_{Ld} = (k_{di}^2 \langle D_i \rangle \langle C_i \rangle - k_{dv}^2 \langle D_v \rangle \langle C_v \rangle)_L \quad (4)$$

donde el subíndice **L** indica la proyección en la dirección longitudinal del tubo. La proyección en la dirección **R**:

$$\dot{\epsilon}_{Rd} = (k_{di}^2 \langle D_i \rangle \langle C_i \rangle - k_{dv}^2 \langle D_v \rangle \langle C_v \rangle)_R \quad (5)$$

da el cambio en el espesor del tubo.

Para la proyección en la dirección **Tg** es:

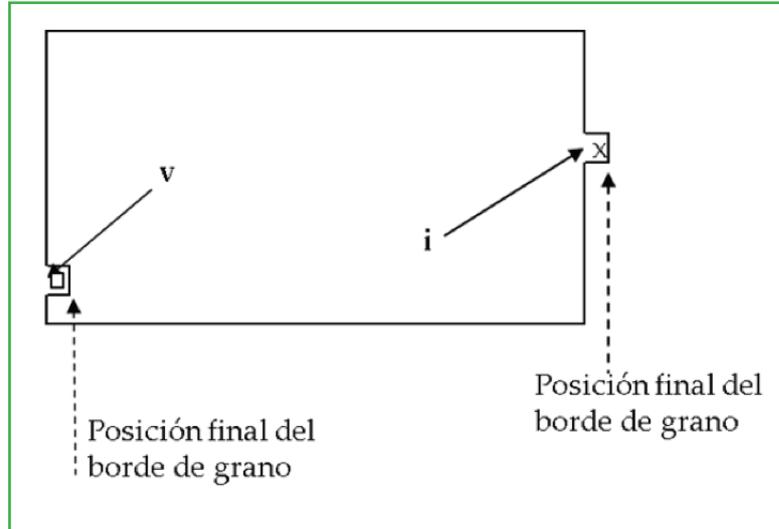
$$\dot{\epsilon}_{Tgd} = (k_{di}^2 \langle D_i \rangle \langle C_i \rangle - k_{dv}^2 \langle D_v \rangle \langle C_v \rangle)_{Tg} \equiv 0 \quad (6)$$

Bueno, ¿con lo que acabamos de decir ya podemos poner FIN en este libro? En parte sí, porque explicamos la razón por la cual pueden cambiar las dimensiones de un tubo de presión en las direcciones longitudinal y radial. Pero.....que se haya dicho que debido a la presencia de intersticiales y vacancias y de dislocaciones, y a la interacción entre ellos, no se produce ningún cambio de dimensiones en la dirección **Tg** ¿nos autoriza a afirmar que, efectivamente, no se modificará el diámetro del tubo de presión durante el funcionamiento de la central nuclear? No, porque mediciones realizadas en aleaciones de circonio irradiadas con neutrones indican que hay una contracción en la dirección paralela al eje cristalográfico  $c$ . ¿Entonces, todo lo que se estuvo diciendo hasta aquí no está bien? Por supuesto que sí, que está bien. Lo que ocurre es que no hemos analizado qué ocurre con los bordes de grano y su ya anunciada interacción con los defectos puntuales.

## **LOS BORDES DE GRANO, LOS DEFECTOS PUNTUALES Y LA IRRADIACIÓN DEL TUBO DE PRESIÓN.**

Pensemos en un grano aislado con un intersticial (i) y una vacancia (v) en su interior, como el representado en la figura 25. Si el intersticial es atrapado por uno de los bordes de grano, ubicándose en

la posición indicada por la flecha, el grano aumentaría su tamaño en la dirección perpendicular al borde que atrapó al intersticial. De la misma forma, si la vacancia es atrapada por uno de los bordes, se produciría la disminución del tamaño del grano en la dirección perpendicular al borde de grano que atrapó a la vacancia.



*Figura 25. Representación del cambio de tamaño de un grano debido al atrape de una vacancia  $v$  y de un intersticial  $x$  por sus bordes de grano.*

Según sea el balance entre el número de intersticiales y el número de vacancias atrapados, será el cambio de dimensiones del grano.

A partir de lo analizado, y nuevamente dentro de la teoría de los procesos de reacción, el número de intersticiales que llega y es atrapado en la unidad de tiempo por un borde de grano perpendicular a una dada dirección  $j$ , es:  $k_{jbg}^2 \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle$  y el correspondiente número de vacancias:  $k_{jbgv}^2 \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle$ , donde  $k_{jbg}^2$  y  $k_{jbgv}^2$  son, ahora, las potencias del borde de grano para el atrape de intersticiales y vacancias, respectivamente, de las caras del grano perpendiculares a la dirección  $j$ . Los subíndices bg indican que son las potencias de atrape de bordes de grano (como d indicaba la de las dislocaciones). Antes de abandonar, transitoriamente, a las potencias de atrape de los bordes de grano, se señala que dependen de la forma y tamaño de los granos del policristal y de la orientación cristalina de cada uno de ellos.

Consecuencias de lo considerado en este punto (teniendo en cuenta nuevamente la figura 15):

La primera consecuencia: considerar el atrape de intersticiales y vacancias por los bordes de grano perpendiculares a la dirección **Tg**, llevaría a un cambio de dimensiones en esa dirección.

La segunda consecuencia: el atrape de defectos puntuales por los bordes perpendiculares a la dirección **L** y perpendiculares a la dirección **R** producirían cambios de dimensiones en esas direcciones, que se sumarían a los producidos debido a la presencia de las dislocaciones.

Por lo mencionado, la contribución de los bordes de grano debe ser incluida en la fórmula (2) para calcular el cambio de dimensiones del tubo de presión en la unidad de tiempo en las direcciones **L**, **Tg** y **R**. Así, resultan:

$$\dot{\epsilon}_L = (k^2_{di} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{dv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle)_L + (k^2_{Lbgi} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{Lbgv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle) \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_{Tg} = (k^2_{di} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{dv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle)_{Tg} + (k^2_{Tgbgi} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{Tgbgv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle) \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_R = (k^2_{di} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{dv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle)_R + (k^2_{Rbgi} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{Rbgv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle) \quad (9)$$

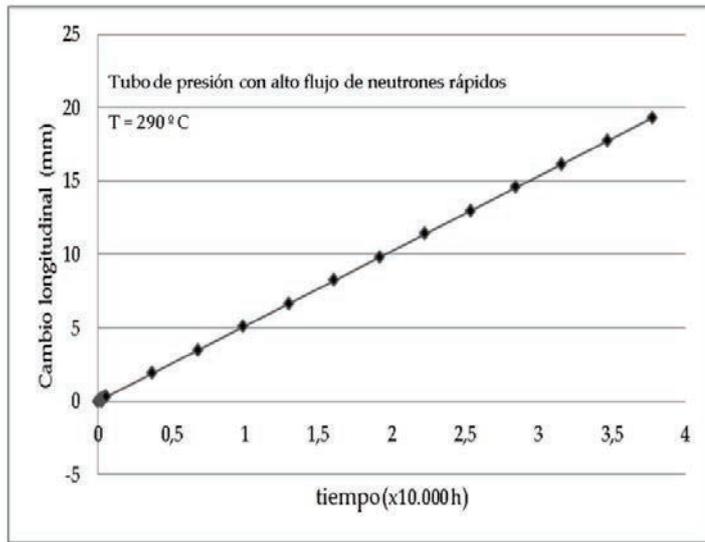
donde el primer paréntesis de cada ecuación encierra la contribución de las dislocaciones en cada dirección y el segundo paréntesis la correspondiente contribución de los bordes de grano. Por supuesto, el término  $(k^2_{di} \langle D_i \rangle \langle c_i \rangle - k^2_{dv} \langle D_v \rangle \langle c_v \rangle)_{Tg}$  para el tipo de dislocaciones consideradas siempre vale cero.

## CÁLCULO DEL CAMBIO DE DIMENSIONES DE LOS TUBOS DE PRESIÓN.

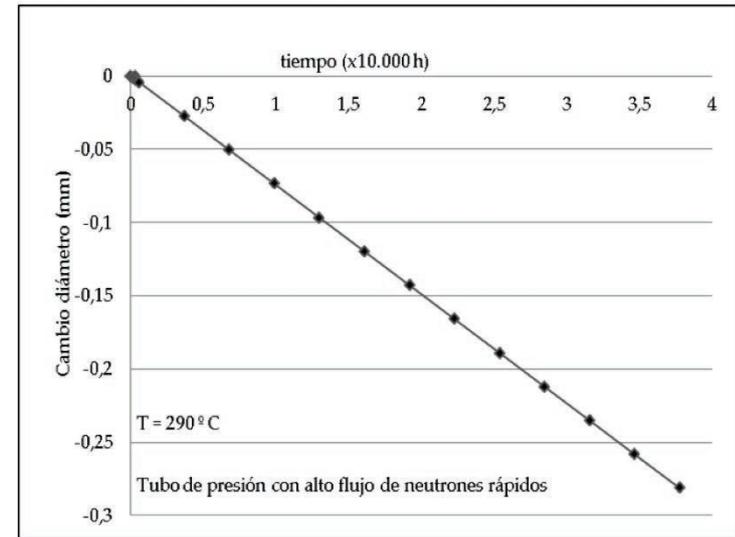
Continuando con las preguntas, cabe ahora la siguiente ¿para qué sirven las fórmulas (7), (8) y (9)? Veamos. Fueron obtenidas a través del modelo presentado al inicio del Capítulo 3 y usando la teoría de los procesos de reacción, para predecir los cambios de dimensiones de tubos que se encuentran en los reactores de centrales nucleares. Modelo que propone que esos cambios de dimensiones dependen del balance entre el número de intersticiales y el número de vacancias creados por la irradiación, que son atrapados por los defectos extendidos presentes en el material de los tubos. Ese balance está dado por las fórmulas (7), (8) y (9) y se tienen esas fórmulas a disposición para calcularlo. Los coeficientes de difusión medios  $\langle D_i \rangle$  y  $\langle D_v \rangle$ , las concentraciones  $\langle c_i \rangle$  y  $\langle c_v \rangle$  de intersticiales y vacancias y las potencias de las dislocaciones y de los bordes de grano para el atrape de intersticiales y vacancias, pueden conocerse a partir de mediciones o de cálculos. Aunque introducirlos luego en las fórmulas para obtener los  $\epsilon$  no es sencillo, eso puede hacerse y se hace! Y prueba de ello son los gráficos mostrados en las figuras 26, en los que se representan los cambios dimensionales debidos a la irradiación en función del tiempo, previstos para un tubo de presión de una central tipo CANDU que recibe un alto flujo de neutrones<sup>21</sup> y cuya temperatura es de 290° C. Fueron obtenidos usando el código semiempírico de cálculo numérico desarrollado por un grupo de investigación del Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina, en el que se tiene en cuenta la microestructura y la orientación de las celdas cristalinas del material, la densidad de las dislocaciones presentes, el flujo de neutrones y la temperatura de los tubos de presión. También se considera el valor del alargamiento longitudinal de un tubo de la central Nuclear Embalse medido después de 1570 días de funcionamiento a plena potencia<sup>22</sup>, en agosto de 1989. Extrapolando los valores del gráfico, se previó un alargamiento por irradiación de 107 mm para 30 años de funcionamiento de la central, que no es poco! Este alargamiento estuvo en buen acuerdo con el previsto por diseño.

<sup>21</sup> Los tubos de presión que por su ubicación en la calandria reciben un menor flujo de neutrones tienen un comportamiento similar, con cambios de dimensiones menores.

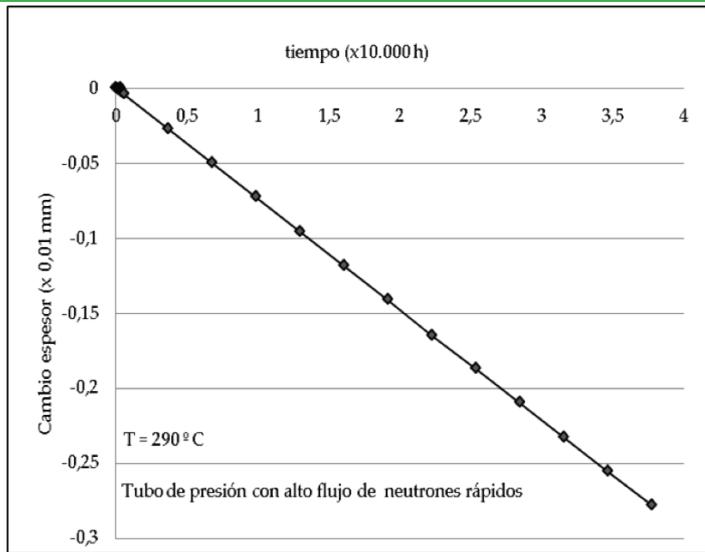
<sup>22</sup> Días a plena potencia (dpp), se considera: 0,8 x (número de días reales), para tener en cuenta los días en que el reactor no funciona al 100% de su potencia.



a)



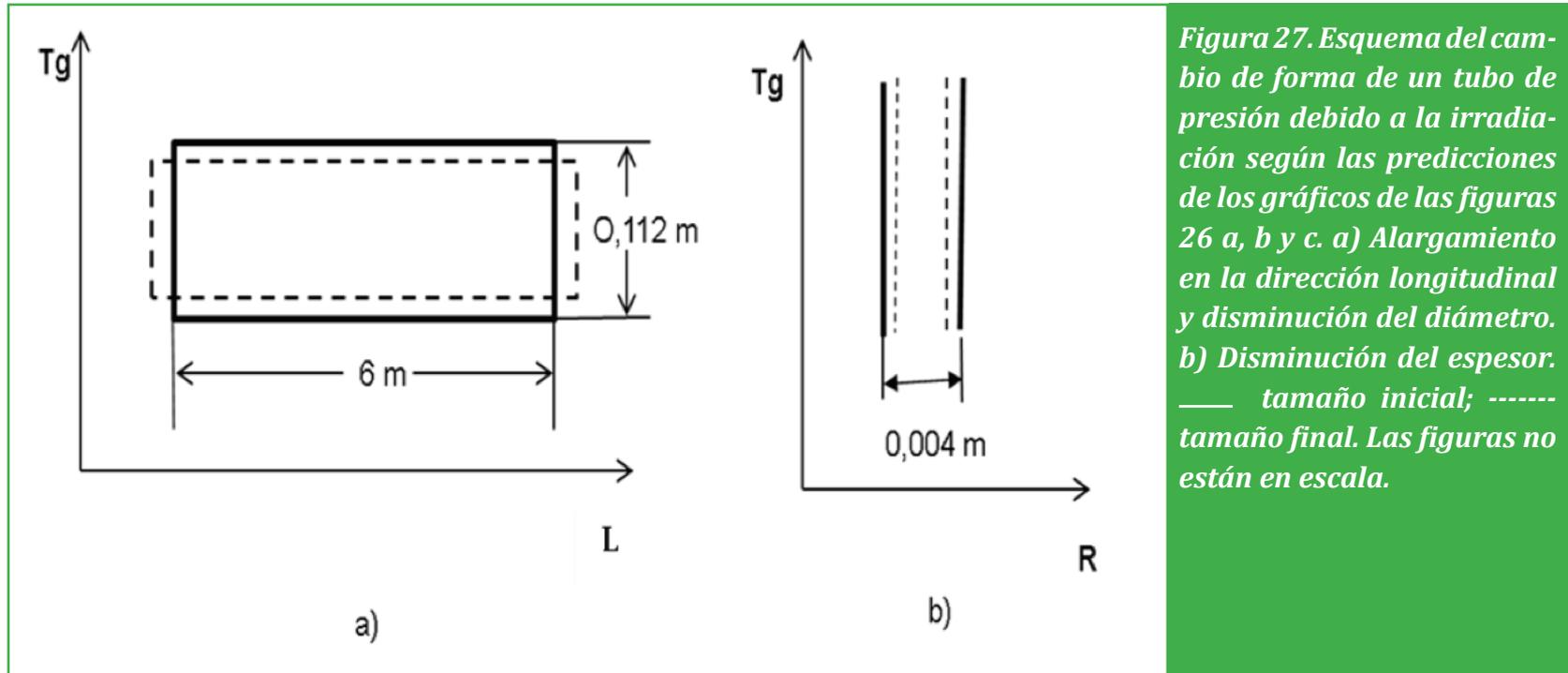
b)



c)

*Figura 26. Cambios predichos en las dimensiones de un tubo de presión de una central nuclear tipo CANDU que recibe un alto flujo de neutrones rápidos, usando el código semiempírico de cálculo numérico desarrollado en el grupo de Teoría de Defectos y Mecánica del Continuo (TEDEMECO) del Departamento Materiales del Centro Atómico Constituyentes, CNEA. a) Cambio en la dirección longitudinal; b) Cambio en el diámetro; c) Cambio en el espesor.*

Las predicciones de los gráficos están esquematizadas en las figuras 27.



Los tubos se alargarán (como ya se adelantó) en la dirección longitudinal  $L$ , disminuirán su diámetro (disminuirá el tamaño en la dirección  $Tg$ ) y disminuirán su espesor. Y todos esos cambios sin que estén aplicadas fuerzas externas. Sólo debido a la interacción entre los defectos puntuales creados por la irradiación y los defectos extendidos dislocaciones y bordes de grano presentes en el material del tubo de presión. Pero no debemos olvidar que esos defectos extendidos tienen características muy particulares por el proceso de fabricación: las dislocaciones tienen una distribución espacial especial, que ya se ha mostrado; los bordes de grano tienen una forma y tamaño particulares, por la forma y tamaño particulares de los granos que limitan. Además, tampoco podemos olvidar que intersticiales

y vacancias tienen que moverse, dentro de cada grano, en la anisotrópica estructura hexagonal compacta del circonio para llegar hasta las dislocaciones y los bordes de grano. Y que esa anisotropía de la estructura hexagonal compacta del circonio, se refleja en la anisotropía del coeficiente de difusión de cada intersticial y de cada vacancia. Por otra parte, el cálculo de las diferentes potencias de atrape muestra que también tienen una fuerte dependencia de esta anisotropía (ver Apéndice II dentro del **Apéndice II**). Por esto, es hoy plenamente aceptado que la anisotropía de la difusión de los defectos puntuales es una responsable fundamental del cambio de dimensiones de los tubos de presión de los reactores nucleares en funcionamiento.

Al mirar las figuras 27 se ve, además, que el cambio de forma del tubo de presión es también anisotrópico, ya que ese cambio es distinto según la dirección que se considere. Ese cambio de dimensiones tiene una particularidad extra: es un cambio de dimensiones a volumen constante, como puede verificarse usando los gráficos de las figuras 26a, b y c, a partir de los cuales pueden conocerse las dimensiones del tubo y los cambios de dimensiones relativos en cada instante. En particular, como consecuencia, la suma de estos últimos para cada tiempo es cero (como ejemplo, para el último punto de los gráficos es:  $\Delta L / L = 19,3 \text{ mm} / 6000 \text{ mm} = 0,0032$ ;  $\Delta D / D = -0,28 \text{ mm} / 112 \text{ mm} = -0,0025$ ;  $\Delta E / E = -0,003 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = -0,0007$ ).

Y este cambio de forma debido a la irradiación que se produce a volumen constante y en ausencia de todo tipo de fuerzas aplicadas, se define como **crecimiento por irradiación**. Este fenómeno de crecimiento por irradiación fue y es muy estudiado en el campo de la tecnología nuclear porque se presenta no sólo en los tubos de presión, sino también en otras componentes de los reactores nucleares que tienen a las aleaciones de circonio como material constitutivo (**ver Apéndice III**).

Como comentario final: en la primera hoja del libro ya se había adelantado: “Estamos acostumbrados a ver crecer a los niños y cachorros, a las plantas, a los hongos....Pero sí, también algunos tubos metálicos crecen a pesar de no tener vida biológica. No cambian su peso, pero cambian de tamaño, especialmente aumentan su longitud, sin que se les apliquen fuerzas....Algunos de los tubos metálicos que se encuentran en los reactores de las centrales nucleares en funcionamiento, son ejemplos de tubos

que tienen ese particular modo de crecer” (aunque en ese momento no conocíamos todavía a esos tubos). Pero ahora que conocemos a los tubos de presión, que conocemos el fenómeno de crecimiento por irradiación, que sabemos que es a volumen constante, podemos también preguntarnos (aunque ahora ya sabríamos la respuesta): ¿algunos tubos adelgazan? Sí, también adelgazan!

### EPÍLOGO III (O SÍNTESIS DE LO VISTO DESDE EL EPÍLOGO II).

A partir del Epílogo II se ha señalado que, por los procesos que deben realizarse para fabricarlos, la orientación cristalina de los granos de la microestructura de los tubos de presión no es al azar. En la mayoría de ellos las celdas hexagonales están “acostadas”, con la altura de la celda (eje **c**) paralela a la dirección de la tangente al tubo. También por el proceso de fabricación, los tubos de presión tienen un número muy grande de **dislocaciones**: aproximadamente  $7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ , que tampoco están distribuidas al azar. La mayoría está ubicada paralela al eje **c** de la celda hexagonal y, por esta ubicación, se la denomina de tipo prismática. Por lo dicho, la mayoría de las dislocaciones resulta, entonces, paralela a la dirección tangencial (**Tg**) del tubo. Por esto, cuando recibe intersticiales o vacancias se produce un cambio del tamaño del tubo en la dirección longitudinal (**L**) y en la dirección radial (**R**), pero no se produce ninguna variación de tamaño en la dirección **Tg**.

Dentro de la teoría de los procesos de reacción (descrita en el **Apéndice II**), el número de intersticiales que llega y es atrapado por las dislocaciones presentes en el circonio del tubo de presión en la unidad de tiempo, puede escribirse como el producto de la concentración de intersticiales, de su coeficiente de difusión medio y de la potencia de las dislocaciones para el atrape de los intersticiales:  $k_{di}^2 \langle Di \rangle \langle c_i \rangle$ . De la misma forma, el número de vacancias que llega y es atrapado por las dislocaciones presentes en el circonio del tubo es:  $k_{dv}^2 \langle Dv \rangle \langle c_v \rangle$ . Según sea el signo del balance:

$$(\text{N}^\circ \text{ de intersticiales atrapados en la u. t.} - \text{N}^\circ \text{ de vacancias atrapadas en la u.t.}) \quad (10)$$

el cristal aumentará su tamaño (si es positivo) o lo disminuirá (si es negativo).

Además de las dislocaciones, en el material del tubo de presión (como en todo policristal) se encuentran otros defectos extendidos: los bordes de grano. Son las superficies de separación entre los gra-

nos. La microestructura del tubo puede considerarse formada por un conjunto muy grande de granos alargados de fase hexagonal compacta, ubicados uno a continuación del otro en las tres dimensiones del espacio. Nuevamente, por el proceso de fabricación el mayor tamaño de los granos ( $35 \times 10^{-6}$  m) está en la dirección del eje del tubo (**L**), el menor tamaño ( $0,7 \times 10^{-6}$  m) en el espesor del tubo (**R**) y el tamaño intermedio ( $7 \times 10^{-6}$  m) en la dirección tangencial del tubo (**Tg**).

Los bordes de grano pueden atrapar a los defectos puntuales y, nuevamente dentro de la teoría de los procesos de reacción, el número de intersticiales que llega y es atrapado en la unidad de tiempo por los bordes de grano perpendiculares a una dirección dada, puede escribirse:  $k^2_{Lbgi} \langle Di \rangle \langle c_i \rangle$ , para el atrape de las caras perpendiculares a la dirección **L**;  $k^2_{Tgbgi} \langle Di \rangle \langle c_i \rangle$  para las perpendiculares a la dirección **Tg** y  $k^2_{Rbgi} \langle Di \rangle \langle c_i \rangle$  para las perpendiculares a la dirección **R**. De la misma forma, el número de vacancias que llega y es atrapado en la unidad de tiempo por los diferentes bordes de grano es:  $k^2_{Lbgv} \langle Dv \rangle \langle c_v \rangle$ ;  $k^2_{Tgbgv} \langle Dv \rangle \langle c_v \rangle$  y  $k^2_{Rbgv} \langle Dv \rangle \langle c_v \rangle$ . Al atrapar a los defectos puntuales, los bordes de grano contribuyen también al crecimiento de los tubos de presión y su contribución debe ser incluida en la fórmula (10) para calcular el alargamiento o acortamiento en la unidad de tiempo en las direcciones **L**, **Tg** y **R**, como está escrito en las fórmulas (7), (8) y (9) anteriores y que no se repetirán aquí.

Como corolario de lo que se mide en aleaciones de circonio irradiadas con neutrones y de lo que se predice mediante cálculos se concluye que, debido sólo a la interacción entre los defectos puntuales creados por la irradiación (con coeficientes de difusión anisotrópicos) y los defectos extendidos presentes en el material del tubo de presión (que tienen una distribución espacial anisotrópica), estos tubos se alargarán en la dirección longitudinal **L**, disminuirán su diámetro (disminuirá el tamaño en la dirección **Tg**) y disminuirán su espesor durante el tiempo que estén en el reactor. Y ese cambio de dimensiones tiene la particularidad extra de ser a volumen constante; el fenómeno se denomina **crecimiento por irradiación**.

**Fin del Epílogo III.**

# APÉNDICE I

## PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS TUBOS DE PRESIÓN

En varias oportunidades a lo largo del libro se han asociado características de los tubos de presión directamente al proceso de fabricación. Por eso, aunque sea muy brevemente, debemos analizarlo ahora. Pero antes de describirlo, es necesario hacer una aclaración: en este momento (año 2017) la Central Nuclear Embalse está fuera de servicio porque, después de haber funcionado exitosamente más de treinta años calendario, algunos de sus componentes deben ser cambiados para que pueda funcionar otros treinta años. En particular, deben ser cambiados los tubos de presión. Los tubos que estuvieron en el reactor hasta ahora fueron fabricados en Canadá y recibidos en la Argentina. Los nuevos tubos de presión que estarán en el reactor cuando comience nuevamente a funcionar son tubos cuya etapa final de fabricación fue ya realizada en Argentina. No sólo fue realizada en Argentina, sino que se usó una nueva tecnología también desarrollada en el país. Para conocer cómo es el actual camino de fabricación de los tubos de presión, nada mejor que recurrir a lo que nos dice la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en su página <http://www.cnea.gov.ar/Central-Nuclear-Embalse-sub> o en la más detallada <http://www.cnea.gov.ar/noticias-detalle?nid=2831#sthash.kUT5Kgza.pdf> o en el artículo ameno (y con algo de la historia) “Tecnología CANDU con sello argentino”, publicado online en U-238 en el mes de mayo de 2014. Estas páginas describen: “Cada tubo de presión se fabrica a partir de un tubo extrudado provisto por la empresa Wah-Chang & Co, USA. Esta empresa fabrica el lingote de la aleación Zr-2.5%Nb (circonio-2.5% niobio), lo forja, luego lo mecaniza y finalmente lo extruda en caliente. Esta es la materia prima que recibe CONUAR-FAE en la Argentina.”

Antes de seguir con el texto que nos da la CNEA, algunos comentarios sobre algunos de los términos que aparecen en el párrafo anterior: lingote, forja, mecanizado y extrudado en caliente, además de CONUAR (Combustibles Argentinos) y FAE (Fábrica de Aleaciones Especiales).

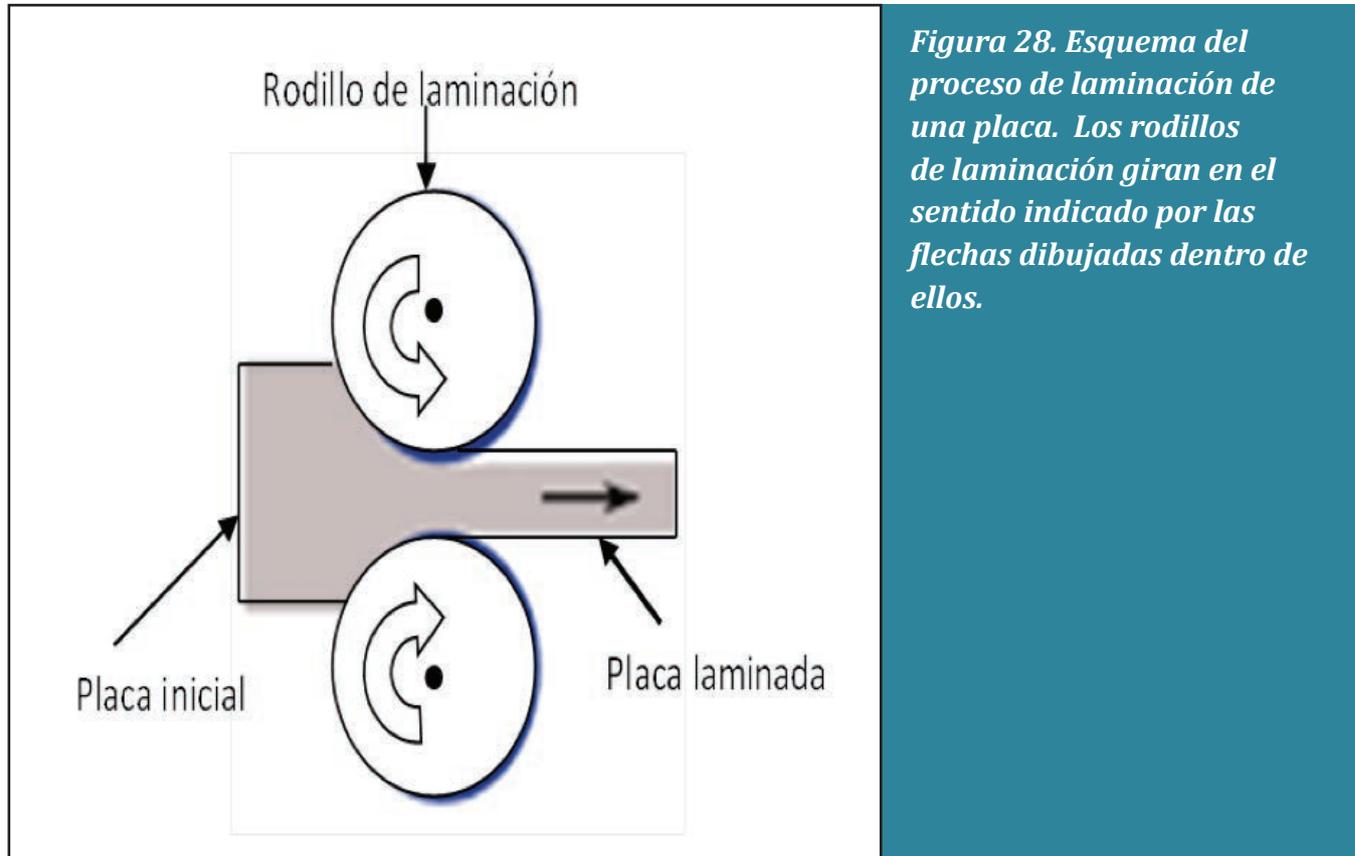
-Lingote: una de las acepciones del diccionario de la Real Academia Española (RAE) lo define como un “trozo o barra de metal en bruto”. En el caso del tubo de presión, el lingote de la aleación circonio-2.5% niobio se obtiene por la solidificación continua, en un molde de cobre enfriado por agua, del material que proviene del proceso de refundición continua de la punta de un electrodo de circonio con los elementos de aleación. Se realiza en un horno de arco en vacío.

En la misma fuente, el diccionario de la RAE, se encuentra: Forja: “Acción de forjar”. Forjar: “Dar la primera forma con el martillo a cualquier pieza de metal”. En nuestro caso es una máquina la que “martilla” el lingote. También una máquina es la que realiza el mecanizado para dar “retoques” al lingote forjado para que obtenga la forma adecuada y pueda realizarse el último proceso mencionado: la extrusión.

Volviendo al ya tantas veces usado diccionario de la RAE: Extrusión: “Acción y efecto de extrudir” y Extrudir<sup>23</sup>: “Tecnol. Dar forma a una masa metálica, plástica, etc., haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta” (¡al comer un churro, estamos comiendo masa extrudida!). Para que salga a través del orificio (abertura) se la empuja ejerciendo sobre ella una gran presión y así se pueden formar productos de diferentes secciones transversales uniformes, entre ellos tubos. La extrusión para la obtención final de los tubos de presión es en caliente, porque se realiza a alta temperatura: 815° C. Estos tubos extrudados (extrudidos debería decir, por lo señalado en el pie de página), constituyen ahora la materia prima que llega a la Argentina; son recibidos por CONUAR S.A. y FAE S.A., que los entregan a la Planta Piloto de Fabricación de Aleaciones Especiales (PPFAE), perteneciente a la CNEA y ubicada en el Centro Atómico Ezeiza. Es en esta planta donde se realizan los últimos pasos para la obtención adecuada de los nuevos tubos de presión. Como nos cuentan las páginas Web mencionadas: “En esa planta la CNEA realiza un proceso de laminación en frío. Esto es, deformar el tubo hasta alcanzar las dimensiones finales esperadas para ser colocados en la central.” Para poder finalizar este párrafo, falta decir algunas palabras sobre el proceso de la laminación en frío que permite obtener los tubos con las dimensiones exigidas para ser ubicados en el núcleo del reactor de Embalse donde permanecerán durante 30 años. Pero antes de pasar a la laminación de tubos, y para entrar en tema,

<sup>23</sup> Debo señalar que, comúnmente, en la jerga metalúrgica de Argentina usamos en vez de la correcta palabra extrudir, la incorrecta palabra extrudar, por supuesto con el mismo significado que la correcta.

unas pocas palabras sobre la laminación de una placa (chapa), que puede entenderse fácilmente mirando la figura 28.



*Figura 28. Esquema del proceso de laminación de una placa. Los rodillos de laminación giran en el sentido indicado por las flechas dibujadas dentro de ellos.*

La laminación de una placa es, simplemente, el proceso de deformación plástica que sufre cuando pasa entre rodillos que giran en el mismo sentido. Esto hace que, simultáneamente, la placa disminuya su espesor y se alargue, mientras que su ancho permanece casi sin modificarse. Esos rodillos son parte de la máquina que realiza el proceso, llamada laminadora. Si se continúa con los ejemplos culinarios, se podría decir que los ricos tallarines que solemos comer los domingos, provienen de una

masa que pasó por una laminadora (la máquina que llevó el bollo de masa inicial al espesor final de los fideos). Claro, ¡eso si no se estiró la masa usando el viejo palo (o rodillo) de amasar!

Las laminadoras de tubos y la forma en que trabajan no pueden ser descriptas de una manera tan simple. En particular, como nos siguen informando las anteriores páginas Web, para que los tubos extrudidos que se reciben desde USA alcancen las dimensiones exigidas es necesario que disminuyan el diámetro exterior y el espesor a la vez que deben aumentar su longitud. Para conseguir esto la laminadora no sólo debe actuar desde el exterior del tubo sino también desde su interior. Durante el proceso particular de fabricación de los nuevos tubos de presión se realizan dos pasos de laminación en frío (laminación sin calentar el material). Entre medio de las dos laminaciones y luego de la última se realiza un control de las dimensiones y un control y acondicionamiento de las superficies externas e internas para eliminar defectos superficiales. Internamente se realiza un bruñido (es un proceso de acabado superficial con el objetivo de elevar la precisión y calidad superficial además de mejorar la macrogeometría: rectificar diámetros, planicidad, redondez, etc.; para este tipo de trabajo se usan fundamentalmente piedras abrasivas) y externamente un pulido. Todas las mediciones realizadas en el tubo terminado: espesor, diámetros interno y externo, la circularidad y rugosidad deben encontrarse dentro de los valores exigidos por la especificación de fabricación dada por AECL (Atomic Energy Canada Limited), diseñador de los Reactores CANDU.

Debido a todo el proceso de fabricación y sobre todo durante la extrusión y la laminación en frío, se crean tensiones dentro del material. Para disminuir (relajar) estas tensiones, y como paso final, se lleva al tubo a una autoclave donde se lo deja a 400° C durante 24 horas bajo atmósfera de vapor de agua. Junto con la relajación de las tensiones del material se genera una capa de óxido protector en las superficies interna y externa. Luego de las revisiones finales, el tubo queda terminado y listo para ser instalado en el reactor.

A partir de la descripción del proceso de fabricación, pueden entenderse inmediatamente algunas de las características de la microestructura del tubo. En primer lugar, la forma alargada de los granos: cuando se alarga el tubo por la laminación, se alarga cada uno de los granos que lo forman, adquirien-

do su mayor dimensión en la dirección del eje del tubo y su menor dimensión en el espesor. Además, el alto número de dislocaciones se entiende por la fuerte deformación que sufre el material, fundamentalmente en la extrusión y en los dos procesos de laminación (todos los metales deformados tienen un alto número de dislocaciones). Por otra parte, y aunque esto sea imposible de justificar en este libro, la orientación cristalina de los granos, en su mayoría con el eje  $c$  de la celda hexagonal paralela a la dirección tangencial del tubo, también se debe a los procesos de deformación involucrados.

Los cambios de dimensiones de los nuevos tubos de presión podrán ser predichos por el código de cálculo numérico semiempírico usado para obtener las figuras 26, introduciendo en él las diferencias en la microestructura que puedan surgir como consecuencia del nuevo proceso de fabricación.

## APÉNDICE II

### TEORÍA DE LOS PROCESOS DE REACCIÓN

Se hará una mención “a vuelo de pájaro” de esta teoría, simplemente para entender por qué se la necesita para calcular el cambio de dimensiones de un tubo de presión y por qué el número de intersticiales que llega y es atrapado por unidad de tiempo por las dislocaciones o bordes de grano presentes en un material, en particular el circonio, puede escribirse como el producto  $k^2 \langle Di \rangle \langle c \rangle$ . Y con expresiones equivalentes para las vacancias.

Veamos por qué se la necesita. Calcular el cambio de dimensiones de un material cuando se lo irradia, considerando la creación de defectos puntuales (intersticiales y vacancias en igual número), la difusión de estos defectos puntuales que, a su vez, pueden desaparecer al recombinarse o cuando son atrapados por defectos extendidos como las dislocaciones y los bordes de grano, es extremadamente complejo. A lo mencionado hay que agregar que, en los materiales hexagonales, la difusión de esos defectos puntuales es anisotrópica. Así, en el circonio y como ya fue señalado, el coeficiente de difusión  $D_c$  en la dirección paralela a la altura del prisma hexagonal (dirección **c**) es diferente al coeficiente de difusión  $D_a$  sobre la base del prisma hexagonal, tanto para intersticiales como para vacancias (ver el Apéndice II' dentro de este **Apéndice II**).

Para obtener una solución aproximada a este problema complejo es que se recurre a la teoría de los procesos de reacción. En esta teoría:

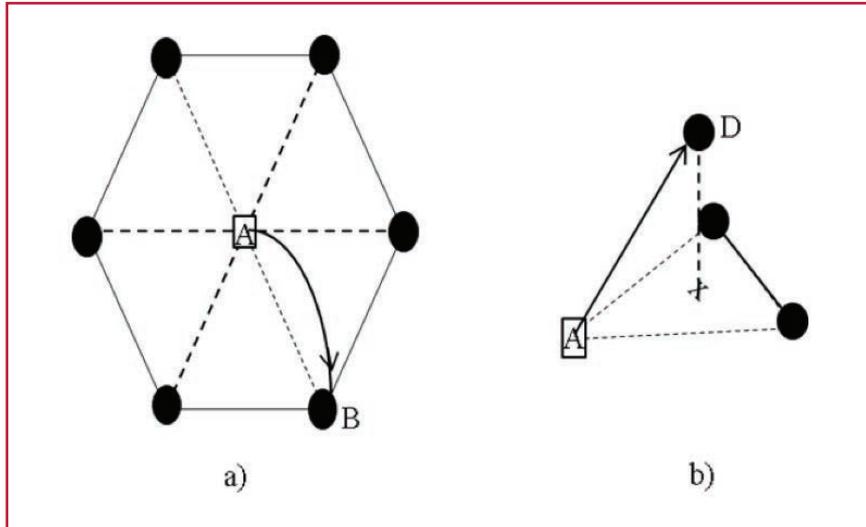
a) el material anisotrópico real es reemplazado por un “medio efectivo” isotrópico en el que las dislocaciones y los bordes de grano son “sumideros” que están distribuidos uniformemente y que atrapan a los defectos puntuales con la misma fuerza que el material real, caracterizándose esa fuerza por las ya conocidas potencias de atrape  $k_d^2$  y  $k_{Lbg}^2$ ,  $k_{Tgbg}^2$  y  $k_{Rbg}^2$ , respectivamente.

b) se supone, también, que los defectos puntuales son creados uniformemente en el “medio efectivo”. El balance entre el número de intersticiales (vacancias) creados por la irradiación y los que son atrapados por los sumideros o que se recombinan con vacancias (intersticiales), resulta en una concentración uniforme en el “medio efectivo” igual a  $\langle c \rangle$  ( $\langle c_v \rangle$ ).

c) intersticiales y vacancias se mueven en el “medio efectivo” con coeficientes de difusión  $\langle D_i \rangle$  y  $\langle D_v \rangle$ , respectivamente, igual en todas las direcciones. A estos coeficientes se les asignan, generalmente, los valores:  $\langle D_i \rangle = \sqrt[3]{D_{ai}D_{ai}D_{ci}}$  y  $\langle D_v \rangle = \sqrt[3]{D_{av}D_{av}D_{cv}}$ , para tomar en cuenta que el coeficiente de difusión del “medio efectivo” es un valor medio de los coeficientes de difusión anisotrópicos en el medio real, al cual reemplaza.

Estas aproximaciones y las consideraciones hechas anteriormente en el párrafo: **Las dislocaciones, los defectos puntuales y la irradiación del tubo de presión**, justifican que en este “medio efectivo”, que reemplaza al material real, el número de defectos atrapados por un tipo particular de sumidero esté dado por la correspondiente expresión  $k^2 \langle D \rangle \langle c \rangle$ .

Apéndice II': Como ejemplo que muestra la anisotropía de la difusión de los defectos puntuales en una red cristalina hexagonal compacta, se mirará el caso de la difusión de una vacancia. En la figura 29 se muestran los dos tipos de saltos que puede realizar, estando ubicada inicialmente en el sitio A, para intercambiar su posición con un átomo vecino. En un tipo de salto (figura 29a) intercambiaría su posición con uno de los átomos ubicado en una de las seis posiciones equivalentes de la base (posiciones B). Así, contribuiría a la difusión sobre la base del prisma y no contribuiría a la difusión en la dirección c ( $D_c = 0$  para este salto). En el otro tipo de salto (figura 29b), la vacancia alcanzaría una de las seis posiciones equivalentes (D) ocupadas por los átomos ubicados en el plano intermedio entre las dos bases del hexágono (son posibles 3 saltos hacia el plano intermedio superior y tres posibles saltos hacia el plano intermedio inferior). Estos saltos tienen una componente en el plano de la base y también una componente de salto en la dirección c que lleva a la difusión en la dirección perpendicular a la base del prisma. Ambos tipos posibles de saltos muestran claramente la anisotropía de la difusión, que será tanto mayor cuanto más alejado de 1 esté el cociente ( $D_c / D_a$ ).



**Figura 29.** Representación de los posibles saltos de una vacancia ubicada inicialmente en el sitio A del plano de la base de la celda hexagonal. a) al sitio vecino B ubicado en el mismo plano (el eje c es perpendicular). b) al sitio vecino D ubicado en el plano intermedio entre las dos bases del hexágono. Este salto tiene una componente en el plano de la base y una componente en la dirección c (el eje c es paralelo a la dirección xD).

Apéndice II'': A partir de resultados de cálculos complejos y dentro de la misma teoría de los procesos de reacción, las potencias de atrape de las dislocaciones que se encuentran dentro de los granos de un tubo de presión pueden aproximarse por un polinomio de tercer grado en  $(D_c/D_a)$ :

$$k^2_d = [4,85 - 2,83 (D_c/D_a) + 1,05 (D_c/D_a)^2 - 0,13 (D_c/D_a)^3] \times 10^{14} \text{ m}^{-2} \quad (11)$$

donde los coeficientes numéricos resultan de considerar la densidad de dislocaciones presente en el material del tubo de presión (aproximadamente  $7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ). Como la anisotropía del coeficiente de difusión para intersticiales es, generalmente, distinta de la anisotropía para las vacancias, para calcular  $k^2_{di}$  o  $k^2_{dv}$  se reemplaza  $(D_c/D_a)$  por  $(D_c/D_a)_i$  o  $(D_c/D_a)_v$ , respectivamente.

Para las potencias de cada uno de los bordes de grano valen expresiones similares a la (11), con distintos coeficientes numéricos. Para la forma de paralelepípedo de los granos en un tubo de presión

( $35 \times 10^{-6}$  m en la dirección longitudinal,  $7 \times 10^{-6}$  m en la tangencial y  $0,7 \times 10^{-6}$  m en la radial), con la densidad de dislocaciones de  $7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  dentro de ellos y considerando el eje **c** de las celdas hexagonales paralelo a la dirección **Tg** del tubo de presión, las aproximaciones resultan:

$$k_{\text{Lbg}}^2 = [0,91 - 0,52(Dc/Da) + 0,26(Dc/Da)^2 - 0,05(Dc/Da)^3] \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \quad (12)$$

$$k_{\text{Rbg}}^2 = [4,53 - 2,58(Dc/Da) + 1,29(Dc/Da)^2 - 0,24(Dc/Da)^3] \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \quad (13)$$

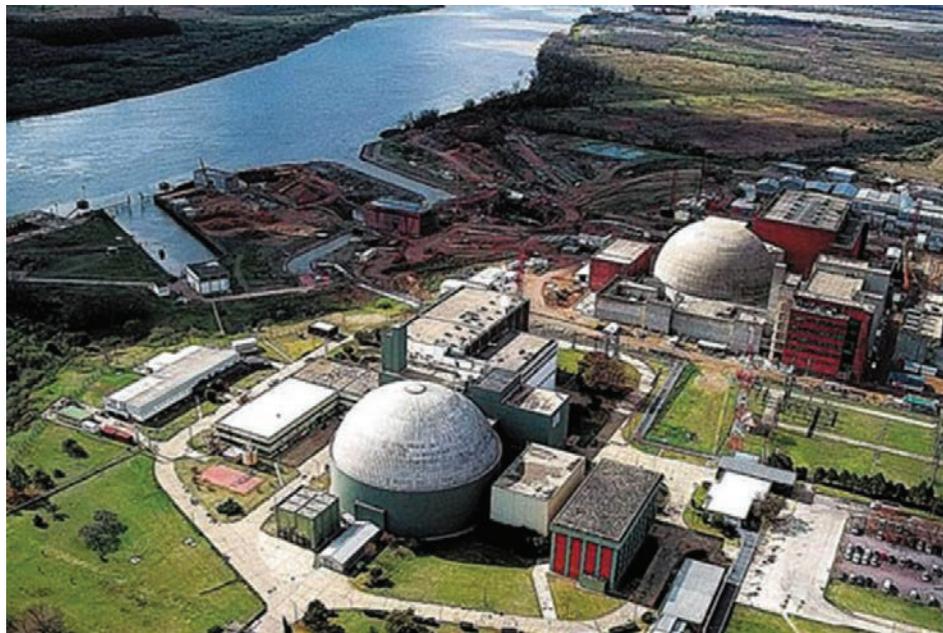
$$k_{\text{Tgbg}}^2 = [1,05 + 2,55(Dc/Da) - 0,69(Dc/Da)^2 + 0,09(Dc/Da)^3] \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \quad (14)$$

Estas expresiones (11), (12), (13) y (14) no dejan lugar a dudas. La anisotropía de la difusión determina las potencias de atrape, tanto de las dislocaciones como de los bordes de grano. Esto refuerza lo ya señalado: la anisotropía de la difusión es una responsable fundamental del fenómeno del crecimiento por irradiación.

## APÉNDICE III

### ATUCHA I Y ATUCHA II

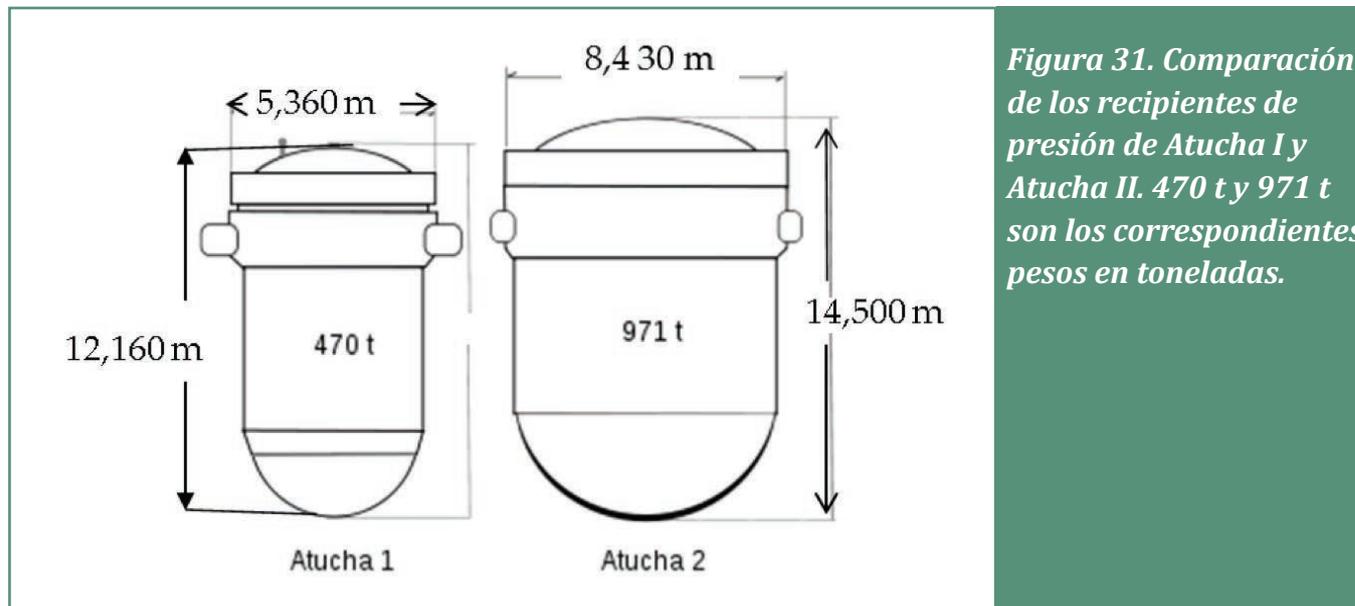
Las características de las centrales nucleares Atucha I y Atucha II son distintas de las características de la central nuclear Embalse que ya se han mirado en detalle, si bien es idéntico el proceso por el cual se genera calor para generar la energía eléctrica: la fisión de los núcleos de uranio que se encuentran en las pastillas del combustible nuclear de óxido de uranio. Y son diferentes ya mirándolas desde afuera. Al acercarse a la zona en la que están las dos centrales en Lima, se ven dos grandes semiesferas a orillas del río Paraná (figura 30), una correspondiente a la central nuclear Atucha I y la otra a la central nuclear Atucha II, a diferencia del cilindro con domo que se ve al acercarse a Embalse. Son las semiesferas externas de hormigón armado de 0,70 m de espesor, dentro de las cuales se encuentran herméticas esferas de acero de 50 m de diámetro que contienen, entre otras componentes, los correspondientes reactores nucleares. El diámetro de la semiesfera exterior de Atucha I es de 56 m; la semiesfera de Atucha II es algo más grande.



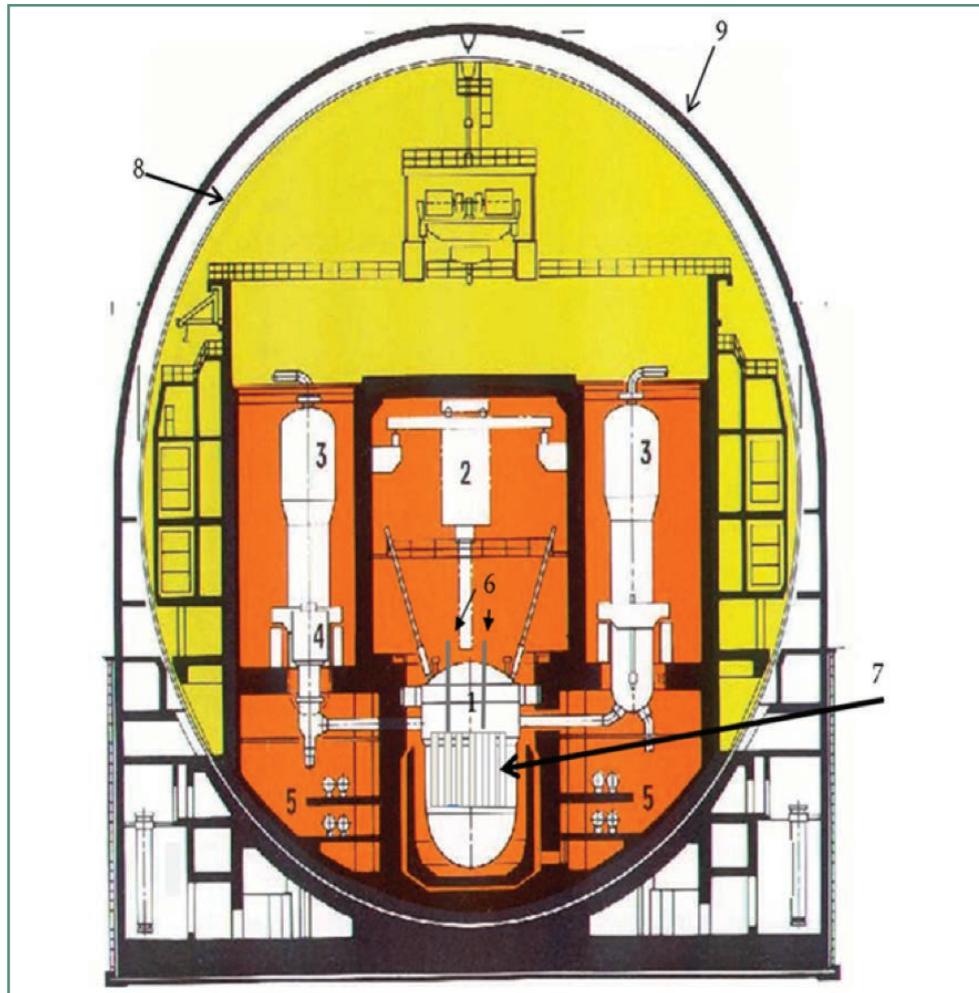
*Figura 30. Vista externa de las centrales nucleares Atucha I y Atucha II junto al río Paraná*

Por dentro también son distintas las centrales Atucha I y II respecto a la central de Embalse: mientras que en el reactor nuclear de ésta los tubos que contienen los elementos combustibles están ubicados en forma horizontal, en Atucha I y Atucha II los tubos que contienen los elementos combustibles están ubicados en forma vertical. Pero la diferencia fundamental entre las centrales nucleares de Embalse y Atucha I y II es que la primera es de tubos de presión (cada uno sometido a alta presión y a los que conocemos muy bien) y Atucha I y II son centrales de recipientes de presión: la alta presión es mantenida por un único recipiente.

En efecto, en Atucha I y en Atucha II el agua pesada que actúa como refrigerante y como moderador está contenida a muy alta presión, 115 atmósferas, dentro del reactor al que, por esta razón, se lo llama recipiente de presión. Está construido en un acero especial (de 0,22 m de espesor) de gran resistencia no sólo a estas altas presiones sino, también, a la radiación. Tiene una forma cilíndrica con la base y tapa semiesféricas como está mostrado en la figura 31 en la que, además, se comparan los correspondientes de ambas centrales.



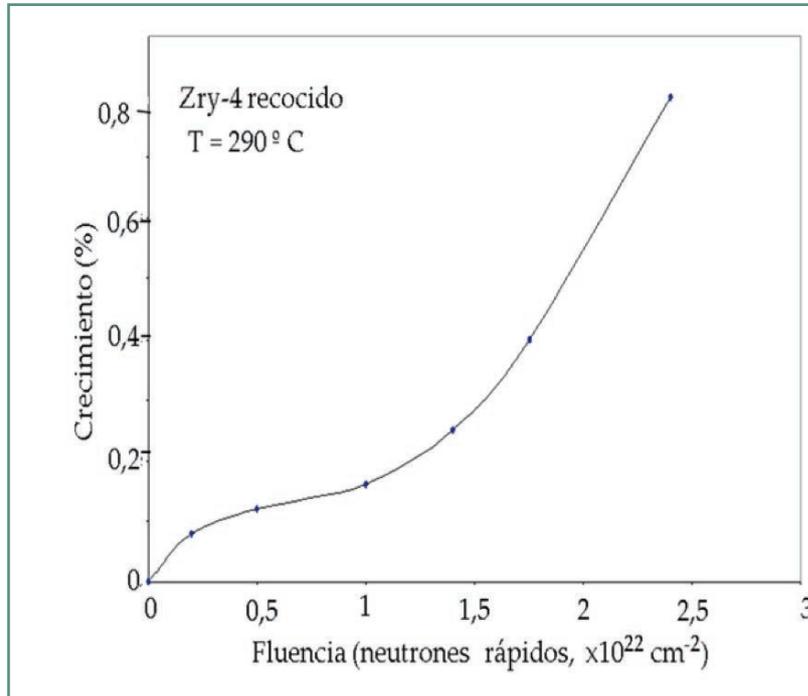
Dentro del recipiente de presión se encuentran los tubos verticales mencionados (figura 32), llamados canales de refrigeración, en su interior se encuentran las vainas de casi seis metros de longitud (5,30 m en Atucha I), dentro de las que se localizan las pastillas de óxido de uranio. Los canales de refrigeración permiten la circulación ascendente del refrigerante, que aumenta su temperatura desde aproximadamente 260° C a la entrada del canal en la parte inferior hasta algo más de 300° C a su salida en la parte superior, que finalmente calienta el agua común que se transforma en vapor en los generadores de vapor. A pesar de que ambos son de agua pesada, refrigerante y moderador están aislados entre sí. Como también ocurre en Embalse.



*Figura 32. Ubicación de las componentes dentro de la semiesfera externa de hormigón armado de 0,70 m de espesor. 1: Recipiente de presión; 2: Máquina de recarga de combustible; 3: Generador de vapor; 4: Bomba del refrigerante del reactor; 5: Enfriador del moderador; 6: Barras de control; 7: Canales de refrigeración que contienen los elementos combustibles; 8: Esfera hermética de acero; 9: Semiesfera externa de hormigón. Esquema general tomado del trabajo: Tasación de la Central Nuclear Atucha II, Ingeniero Daniel Eduardo Martín, Tribunal de Tasaciones de la Nación, [www.ttn.gov.ar](http://www.ttn.gov.ar).*

En Internet pueden encontrarse numerosos artículos que hablan de las características de estas dos centrales nucleares de Lima por lo que aquí no se mencionará ninguna otra. Eso sí, se debe buscar en páginas escritas por personas idóneas: páginas de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA); de Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA), encargada de operar las centrales nucleares de nuestro país, y del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Lo que sí se comentará aquí es que los canales de refrigeración están también fabricados con una aleación de circonio de estructura hexagonal compacta (Zircalloy-4 (Zry-4), distinta de la aleación Zr-2,5%Nb de los tubos de presión) y que también se alargan por efecto de la irradiación. En parte, este alargamiento puede explicarse y calcularse en forma similar a lo ya señalado para el crecimiento de los tubos de presión de la Central Nuclear Embalse. Es necesario introducir en el código de cálculo, eso sí, las características del Zry-4: su microestructura y las orientaciones cristalinas de las celdas hexagonales dentro de cada grano que, por el proceso de fabricación, son distintas a las correspondientes de los tubos de presión. La microestructura es la de un material no deformado (recocido); cada uno de los granos que lo forman puede, aquí, representarse geométricamente por un cubo de 18  $\mu\text{m}$  (recordar, a modo de comparación: los granos de los tubos de presión de la Central Nuclear Embalse se podían representar por paralelepípedos alargados en la dirección longitudinal, que coincidía con la dirección de laminación del material). El número de dislocaciones en el interior de cada grano es bajo:  $10^{12} \text{ m}^{-2}$  (en el tubo de presión, muy deformado, es de  $7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ). En la mayoría de los granos la celda hexagonal compacta del Zircalloy-4 está orientada con el eje *c* paralelo a la dirección radial **R** (en la mayoría de los granos del tubo de presión el eje *c* es paralelo a la dirección tangencial **Tg**). El crecimiento por irradiación en la dirección longitudinal que predice el código para un canal de refrigeración de la Central Nuclear Atucha I que recibe un alto flujo de neutrones, introducidas las nuevas microestructuras y orientaciones del eje *c*, es de 10,9 mm después de 3746 días de funcionamiento a plena potencia. Este valor calculado está en buen acuerdo con el correspondiente valor medido en ese canal: 9,5 mm. Este crecimiento es mucho menor que el correspondiente de 46 mm que se predice para el tubo de presión, al extrapolar el comportamiento lineal de la figura 26a hasta los 3746 días. Sin embargo, a tiempos mayores o, para hablar con más generalidad, a mayores fluencias, en las aleaciones recocidas como la de Zircalloy-4 de los canales de refrigeración se observa, después de un crecimiento lineal, un crecimiento acelerado, como está esquematizado en la figura 33.



*Figura 33. Crecimiento hasta altas fluencias de Zry-4 recocido. A partir de la fluencia  $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  se presentaría el crecimiento acelerado.*

Algunas fórmulas analíticas han sido propuestas para calcular este crecimiento acelerado y observaciones realizadas en microscopios electrónicos de transmisión evidenciaron que está asociado a la creación de nuevos defectos extendidos en la red hexagonal, que no se analizarán en este libro. Pero sí se mencionará la principal consecuencia: como no aumenta linealmente con el tiempo, no pueden extrapolarse los valores de crecimiento por irradiación de los canales de enfriamiento a bajas fluencias para predecir su crecimiento a altas fluencias, como sí puede hacerse para los tubos de presión de Embalse, de material deformado, que no presentan crecimiento acelerado. Si bien esta consideración no fue tomada en cuenta en el diseño original de Atucha I, el conocimiento sobre ese comportamiento de la aleación de circonio llevó a modificaciones en los internos de la central de Atucha II, realizadas antes de su puesta en marcha.

## APÉNDICE IV

### OTROS CAMBIOS DIMENSIONALES

Simplemente se harán dos comentarios sobre otros fenómenos que también llevan al cambio de dimensiones de tubos presentes en los reactores de las centrales nucleares en ausencia de fuerzas aplicadas:

Por hidrógeno: durante el funcionamiento de las centrales nucleares se produce la incorporación de hidrógeno en el circonio de los componentes del reactor. Se ha observado, por ejemplo, en estudios sobre el tema<sup>24</sup> realizados en el Laboratorio de Materiales y Fabricación de Aleaciones Especiales (LMFAE), del Centro Atómico Ezeiza de la CNEA, que esta incorporación lleva al crecimiento en las direcciones axial y tangencial de muestras provenientes de canales de refrigeración de Zircaloy-4 de la Central Nuclear de Atucha I.

Por oxidación: durante la operación de las centrales se forma óxido tanto en la superficie interior como en la exterior de los tubos, lo que también cambia sus dimensiones. Estudios metalográficos en cortes de diferentes tubos de presión<sup>25</sup> mostraron una capa de óxido interior de color negro opaco cuyo espesor variaba entre aproximadamente 6 y 15  $\mu\text{m}$ , según la ubicación del tubo en el reactor. En el exterior, la película de óxido se presentó compacta de color negro brillante con un espesor que variaba entre 1,8  $\mu\text{m}$  y 6,5  $\mu\text{m}$  para los tubos estudiados.

<sup>24</sup> Ovejero J.C., Palmeiro J., Rios R., Vizcaíno P., Banchik A.D., Bianchi D. (2006) Crecimiento del Zry-4 por incorporación de isótopos de hidrógeno y precipitación de ZrH<sub>2</sub>. Presentado y publicado en las Actas del 6to Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales CONAMET/SAM, Santiago, Chile.

<sup>25</sup> Bordoni R., Olmedo A.M. (2004) Caracterización del óxido de la superficie interna y externa de los tubos de presión irradiados de la Central Nuclear Embalse. [www.iaea.org/inis/.../37052874.pdf](http://www.iaea.org/inis/.../37052874.pdf).

## APÉNDICE V

### TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS.

A continuación se copia la Tabla Periódica de los Elementos presentada el 28 de noviembre de 2016 por la International Union of Pure and Applied Chemistry (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) (IUPAC). Incluye los nuevos elementos que se han descubierto e incorporado recientemente con sus nombres definitivos:

**elemento 113:** nihonium, Nh.

**elemento 115:** moscovium, Mc.

**elemento 117:** tennessine, Ts.

**elemento 118:** oganesson, Og.

Estos nombres definitivos fueron propuestos por los científicos (de Japón, Rusia y Estados Unidos) que los descubrieron, aprobados por la IUPAC y, después de una consulta pública que finalizó en noviembre de 2016, quedaron oficializados.

Previo a la invitación realizada a los descubridores a sugerir los nombres y símbolos definitivos, se los había identificado provisoriamente con los nombres y símbolos que se mencionan a continuación:

**elemento 113:** ununtrium, Uut.

**elemento 115:** ununpentium, Uup.

**elemento 117:** ununseptium, Uus.

elemento 118: ununoctium, Uuo.

Nota: Observar el mencionado elemento 109 de la Tabla, el llamado meitnerio (Mt) en homenaje a Lise Meitner.

## TABLA PERIÓDICA

**IUPAC Periodic Table of the Elements**

|   |  |   |  |   |  |  |  |   |  |   |  |   |   |  |   |   |  |
|---|--|---|--|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|---|--|
| 1<br><b>H</b><br>Hydrogen<br>1.008<br>(1.00784, 1.00824)  |  |   |  |   |  |  |  |   |  |   |  |   |   |  |   |   | 2<br><b>He</b><br>Helium<br>4.0026<br>4.002602         |
| 3<br><b>Li</b><br>Lithium<br>6.941<br>6.938, 6.944        | 4<br><b>Be</b><br>Beryllium<br>9.0122<br>9.012182        |   |  |   |  |  |  |   |  |   |  | 5<br><b>B</b><br>Boron<br>10.811<br>10.806, 10.821      | 6<br><b>C</b><br>Carbon<br>12.011<br>12.0096, 12.0109     | 7<br><b>N</b><br>Nitrogen<br>14.007<br>14.0031, 14.0064      | 8<br><b>O</b><br>Oxygen<br>15.999<br>15.9949, 15.9990       | 9<br><b>F</b><br>Fluorine<br>18.998<br>18.9984, 18.9986 | 10<br><b>Ne</b><br>Neon<br>20.180<br>20.1797, 20.1808  |
| 11<br><b>Na</b><br>Sodium<br>22.990<br>22.98976928        | 12<br><b>Mg</b><br>Magnesium<br>24.305<br>24.304, 24.307 |   |  |   |  |  |  |   |  |   |  | 13<br><b>Al</b><br>Aluminum<br>26.982<br>26.9815386     | 14<br><b>Si</b><br>Silicon<br>28.086<br>28.0855, 28.0869  | 15<br><b>P</b><br>Phosphorus<br>30.974<br>30.973762, 30.9738 | 16<br><b>S</b><br>Sulfur<br>32.06<br>32.059, 32.070         | 17<br><b>Cl</b><br>Chlorine<br>35.45<br>35.446, 35.453  | 18<br><b>Ar</b><br>Argon<br>39.948<br>39.948, 39.962   |
| 19<br><b>K</b><br>Potassium<br>39.098<br>39.0983, 39.101  | 20<br><b>Ca</b><br>Calcium<br>40.078<br>40.078, 40.078   | 21<br><b>Sc</b><br>Scandium<br>44.956<br>44.9559122     | 22<br><b>Ti</b><br>Titanium<br>47.88<br>47.867, 47.887   | 23<br><b>V</b><br>Vanadium<br>50.942<br>50.9415, 50.943   | 24<br><b>Cr</b><br>Chromium<br>51.996<br>51.9961, 51.997 | 25<br><b>Mn</b><br>Manganese<br>54.938<br>54.938045, 54.9383 | 26<br><b>Fe</b><br>Iron<br>55.845<br>55.845, 55.847      | 27<br><b>Co</b><br>Cobalt<br>58.933<br>58.933195, 58.9332 | 28<br><b>Ni</b><br>Nickel<br>58.693<br>58.6934, 58.6935  | 29<br><b>Cu</b><br>Copper<br>63.546<br>63.546, 63.546 | 30<br><b>Zn</b><br>Zinc<br>65.38<br>65.38, 65.38       | 31<br><b>Ga</b><br>Gallium<br>69.723<br>69.7231, 69.723 | 32<br><b>Ge</b><br>Germanium<br>72.631<br>72.6305, 72.631 | 33<br><b>As</b><br>Arsenic<br>74.922<br>74.9216, 74.9216     | 34<br><b>Se</b><br>Selenium<br>78.96<br>78.9718, 78.9718    | 35<br><b>Br</b><br>Bromine<br>79.904<br>79.904, 79.904  | 36<br><b>Kr</b><br>Krypton<br>83.796<br>83.796, 83.796 |
| 37<br><b>Rb</b><br>Rubidium<br>85.468<br>85.4678, 85.4678 | 38<br><b>Sr</b><br>Strontium<br>87.62<br>87.62, 87.62    | 39<br><b>Y</b><br>Yttrium<br>88.906<br>88.9062, 88.9062 | 40<br><b>Zr</b><br>Zirconium<br>91.224<br>91.224, 91.224 | 41<br><b>Nb</b><br>Niobium<br>92.906<br>92.9063, 92.9063  | 42<br><b>Mo</b><br>Molybdenum<br>95.94<br>95.94, 95.94   | 43<br><b>Tc</b><br>Technetium<br>98<br>98, 98                | 44<br><b>Ru</b><br>Ruthenium<br>101.07<br>101.07, 101.07 | 45<br><b>Rh</b><br>Rhodium<br>102.91<br>102.91, 102.91    | 46<br><b>Pd</b><br>Palladium<br>106.42<br>106.42, 106.42 | 47<br><b>Ag</b><br>Silver<br>107.87<br>107.87, 107.87 | 48<br><b>Cd</b><br>Cadmium<br>112.41<br>112.41, 112.41 | 49<br><b>In</b><br>Indium<br>114.82<br>114.818, 114.818 | 50<br><b>Sn</b><br>Tin<br>118.71<br>118.71, 118.71        | 51<br><b>Sb</b><br>Antimony<br>121.76<br>121.757, 121.757    | 52<br><b>Te</b><br>Tellurium<br>127.603<br>127.603, 127.603 | 53<br><b>I</b><br>Iodine<br>126.905<br>126.905, 126.905 | 54<br><b>Xe</b><br>Xenon<br>131.29<br>131.29, 131.29   |
| 55<br><b>Cs</b><br>Cesium<br>132.91<br>132.905, 132.905   | 56<br><b>Ba</b><br>Barium<br>137.33<br>137.33, 137.33    | 57-71<br>Lanthanoids                                    | 72<br><b>Hf</b><br>Hafnium<br>178.49<br>178.49, 178.49   | 73<br><b>Ta</b><br>Tantalum<br>180.95<br>180.948, 180.948 | 74<br><b>W</b><br>Tungsten<br>183.85<br>183.84, 183.84   | 75<br><b>Re</b><br>Rhenium<br>186.21<br>186.207, 186.207     | 76<br><b>Os</b><br>Osmium<br>190.23<br>190.23, 190.23    | 77<br><b>Ir</b><br>Iridium<br>192.22<br>192.22, 192.22    | 78<br><b>Pt</b><br>Platinum<br>195.08<br>195.08, 195.08  | 79<br><b>Au</b><br>Gold<br>196.97<br>196.967, 196.967 | 80<br><b>Hg</b><br>Mercury<br>200.59<br>200.59, 200.59 | 81<br><b>Tl</b><br>Thallium<br>204.38<br>204.38, 204.38 | 82<br><b>Pb</b><br>Lead<br>207.2<br>207.2, 207.2          | 83<br><b>Bi</b><br>Bismuth<br>208.98<br>208.98, 208.98       | 84<br><b>Po</b><br>Polonium<br>209<br>209, 209              | 85<br><b>At</b><br>Astatine<br>210<br>210, 210          | 86<br><b>Rn</b><br>Radon<br>222<br>222, 222            |
| 87<br><b>Fr</b><br>Francium<br>223<br>223, 223            | 88<br><b>Ra</b><br>Radium<br>226<br>226, 226             | 89-103<br>Actinoids                                     | 104<br><b>Rf</b><br>Rutherfordium<br>261<br>261, 261     | 105<br><b>Db</b><br>Dubnium<br>262<br>262, 262            | 106<br><b>Sg</b><br>Seaborgium<br>266<br>266, 266        | 107<br><b>Bh</b><br>Bohrium<br>264<br>264, 264               | 108<br><b>Hs</b><br>Hassium<br>277<br>277, 277           | 109<br><b>Mt</b><br>Meitnerium<br>268<br>268, 268         | 110<br><b>Ds</b><br>Darmstadtium<br>285<br>285, 285      | 111<br><b>Rg</b><br>Roentgenium<br>288<br>288, 288    | 112<br><b>Cn</b><br>Copernicium<br>285<br>285, 285     | 113<br><b>Nh</b><br>Nihonium<br>284<br>284, 284         | 114<br><b>Fl</b><br>Flerovium<br>289<br>289, 289          | 115<br><b>Mc</b><br>Moscovium<br>288<br>288, 288             | 116<br><b>Lv</b><br>Livermorium<br>293<br>293, 293          | 117<br><b>Ts</b><br>Tennessine<br>289<br>289, 289       | 118<br><b>Og</b><br>Oganesson<br>294<br>294, 294       |



|  |  |   |  |  |   |   |   |  |   |  |   |  |  |   |
|--|--|---|--|--|---|---|---|--|---|--|---|--|--|---|
| 57<br><b>La</b><br>Lanthanum<br>138.91<br>138.91, 138.91 | 58<br><b>Ce</b><br>Cerium<br>140.12<br>140.12, 140.12  | 59<br><b>Pr</b><br>Praseodymium<br>140.91<br>140.91, 140.91 | 60<br><b>Nd</b><br>Neodymium<br>144.24<br>144.24, 144.24 | 61<br><b>Pm</b><br>Promethium<br>145<br>145, 145 | 62<br><b>Sm</b><br>Samarium<br>150.36<br>150.36, 150.36 | 63<br><b>Eu</b><br>Europium<br>151.96<br>151.96, 151.96 | 64<br><b>Gd</b><br>Gadolinium<br>157.25<br>157.25, 157.25 | 65<br><b>Tb</b><br>Terbium<br>158.93<br>158.93, 158.93 | 66<br><b>Dy</b><br>Dysprosium<br>162.50<br>162.50, 162.50 | 67<br><b>Ho</b><br>Holmium<br>164.93<br>164.93, 164.93 | 68<br><b>Er</b><br>Erbium<br>167.26<br>167.26, 167.26 | 69<br><b>Tm</b><br>Thulium<br>168.93<br>168.93, 168.93 | 70<br><b>Yb</b><br>Ytterbium<br>173.05<br>173.05, 173.05 | 71<br><b>Lu</b><br>Lutetium<br>174.97<br>174.97, 174.97 |
| 89<br><b>Ac</b><br>Actinium<br>227<br>227, 227           | 90<br><b>Th</b><br>Thorium<br>232.04<br>232.04, 232.04 | 91<br><b>Pa</b><br>Protactinium<br>231.04<br>231.04, 231.04 | 92<br><b>U</b><br>Uranium<br>238.03<br>238.03, 238.03    | 93<br><b>Np</b><br>Neptunium<br>237<br>237, 237  | 94<br><b>Pu</b><br>Plutonium<br>244<br>244, 244         | 95<br><b>Am</b><br>Americium<br>243<br>243, 243         | 96<br><b>Cm</b><br>Curium<br>247<br>247, 247              | 97<br><b>Bk</b><br>Berkelium<br>247<br>247, 247        | 98<br><b>Cf</b><br>Californium<br>251<br>251, 251         | 99<br><b>Es</b><br>Einsteinium<br>252<br>252, 252      | 100<br><b>Fm</b><br>Fermium<br>257<br>257, 257        | 101<br><b>Md</b><br>Mendelevium<br>258<br>258, 258     | 102<br><b>No</b><br>Nobelium<br>259<br>259, 259          | 103<br><b>Lr</b><br>Lawrencium<br>260<br>260, 260       |

For notes and updates to this table, see [www.iupac.org](http://www.iupac.org). This version is dated 28 November 2016.  
Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

# BIBLIOGRAFÍA

## a) de Divulgación.

Cirimello R. (2010) *Una mirada a un combustible nuclear*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 33-34. ISBN: 978-987-1323-12-8.

<http://www.cnea.gov.ar>

<https://www.iaea.org>

Huber H. (2011) *Una mirada a cómo se controla la potencia del reactor en una central nuclear*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 57-58. ISBN: 978-987-1323-12-8.

Kamm N. (2010) *Una mirada a una central nuclear*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 31-32. ISBN: 978-987-1323-12-8.

Sajaroff P. (2009) *Una mirada a la calidad como uno de los pilares de la seguridad nuclear*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 15-16. ISBN: 978-987-1323-12-8.

Sarce A. (2011) *Una mirada a la modelización matemática de fenómenos en tubos de presión*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 45-46. ISBN: 978-987-1323-12-8.

Sarce A. (2014) *Espiando a los materiales*. [www.isabato.edu.ar/publicaciones](http://www.isabato.edu.ar/publicaciones). ISBN: 978-987-33-6298-9.

Sarce A. (2016) *Una mirada al interior de los materiales*. Serie: hojitas de conocimiento. [www.cab.cnea.gov.ar/ieds/](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/) en publicaciones, hojitas de conocimiento, 119-120. ISBN: 978-987-1323-12-8.

## **b) General.**

Fortis A.M. (2003) *Daño por radiación*. Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín-Comisión Nacional de Energía Atómica. IT/A-76/03.

Sarce A. (1995 y reediciones) *Introducción a la Ciencia de los Materiales*. Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín-Comisión Nacional de Energía Atómica. PMM/A-161/95 IT-34/95.

## **c) Específica.**

Azzinari D., Carus G., Sabio Calvete M., Ilarri M., Segato M., Perazzo M., Duarte J., Duarte A., Rojas J., Fleitas G., Szieber W.C., Banchik A.D., Flores A.V., Bianchi D.R., Vizcaíno P. (vizcaino@cae.cnea.gov.ar) (2012) *Preparación de la PFAE para la producción de tubos de presión para la CNE*. www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\_Public/46/131/46131472.pdf, 1-8.

Buioli C.P. (constanzabuioli@yahoo.com.ar), Banchik A.D., Vizcaíno P., Samper R., Testone S. (2012) *Estudio de la textura cristalina de tubos de presión de Zr-2.5%Nb mediante figuras de polos DRX*. www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\_Public/46/119/46119580.pdf, 1-6.

Fernández J.R., Monti A.M., Sarce A., Smetniansky-De Grande N. (1994) *Pressure tube deformations via a microstructural evolution description*. *Journal of Nuclear Materials* **210**, 282-289.

Flores A.V., Gómez A.G., Juárez G.A., Loureiro N., Samper R.I., Santisteban J.R., Vicente Álvarez M.A., Tolley A., Condó A., Bianchi R.D., Banchik A.D., Vizcaíno P. (2014) *Typical Zirconium Alloys Microstructures in Nuclear Components*. *Pract. Metallogr.* **51**. Practical Metallography downloaded from www.hanser-elibrary.com by Hanser Verlag (Office) on September 10, 656-674.

Monti A.M., Sarce A., Smetniansky-De Grande N., Savino E.J. and Tomé C.N. (1991-online 2006) *Point defects and sink strength in hcp metals*. Philosophical Magazine A **63**, 925-936.

Sarce A. and Savino E.J. (1990-online 2006) *Grain boundary sink strength in anisotropic materials*. phys. stat. sol. (b) **159**, 557-570.

Sarce A., Savino E.J., Fernández J.R., Monti A.M. y Pasianot R.C. (1998) *Predicción de la deformación de tubos de presión usando una descripción discreta de la red*. Anales SAM'98 e Iberomet V, Argentina, 217-220.

Sarce A. (2001) *The effect of the point defects on the behavior of a crack inside of a pressure tube*. J.Nucl. Mater. **299**, 20-27.

# ¿CRECEN ALGUNOS TUBOS METÁLICOS?

## Una aventura en los reactores nucleares

Estamos acostumbrados a ver crecer a los niños y cachorros, a las plantas, a los hongos... Pero seguramente se han sorprendido al leer el título del libro. Pero sí, también algunos tubos metálicos crecen a pesar de no tener vida biológica. No cambian su peso, pero cambian de tamaño, especialmente aumentan su longitud, sin que se les apliquen fuerzas. Pero no todos los tubos metálicos lo hacen, por eso está la palabra **algunos** en el título. En este libro los conoceremos y, además, descubriremos el porqué de este cambio. El camino a recorrer no es corto, pero no es difícil!

Alicia Sarce

