

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE
LOS MATERIALES**



TESIS DOCTORAL

***INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE VASIJAS NUCLEARES EN BASE A LA
CURVA PATRÓN OBTENIDA MEDIANTE PROBETAS RECONSTRUIDAS***

Autor:

DIEGO FERREÑO BLANCO

Directores:

IÑAKI GORROCHATEGUI SÁNCHEZ

FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

Tesis Doctoral presentada en la Universidad de cantabria para la obtención del Título
de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Santander, octubre de 2007

Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

La vasija a presión constituye el componente estructural de los reactores nucleares de mayor importancia desde el punto de vista de la seguridad, debido a su misión de contención del núcleo. Se trata, además, de un elemento virtualmente insustituible. Por ello, es prioritario considerar que la fluencia neutrónica recibida durante la vida en servicio provoca cambios microestructurales en el acero constitutivo de la vasija, dando lugar a una degradación de propiedades mecánicas que conducen a su fragilización. La fragilización por irradiación neutrónica puede conducir a condiciones de tenacidad que impliquen riesgos importantes en la integridad de la vasija, asociados a una posible rotura frágil, por lo que es necesario un seguimiento de la evolución de las propiedades a lo largo de la vida en servicio de la vasija del reactor.

1.1.1 Los Programas de Vigilancia de las centrales nucleares

Los Programas de Vigilancia constituyen el procedimiento actualmente en vigencia para efectuar el seguimiento de la evolución de las propiedades mecánicas del material constitutivo de la vasija. Consisten en la introducción, desde la primera operación de la central, de cápsulas con probetas del mismo material, véase Figura 1.1, ya sea material base, de soldadura o de zona afectada térmicamente, y con el mismo tratamiento termomecánico de conformado que los empleados en la fabricación de la propia vasija. Las cápsulas se ubican en posiciones estratégicas dentro de la vasija, a fin de que reciban dosis aceleradas de fluencia neutrónica. De forma cíclica y aprovechando los periodos de parada de recarga de la central, se llevan a cabo extracciones de probetas

del interior de las cápsulas, y de su ensayo mecánico se obtiene información sobre la evolución de las propiedades del material en servicio a lo largo del periodo de operación. De esta manera, se puede evaluar la degradación del material por irradiación neutrónica. Entre las propiedades afectadas destaca, muy particularmente, la tenacidad a fractura la cual es sensible a reducirse, incluso ostensiblemente, a medida que se incrementa la dosis recibida.

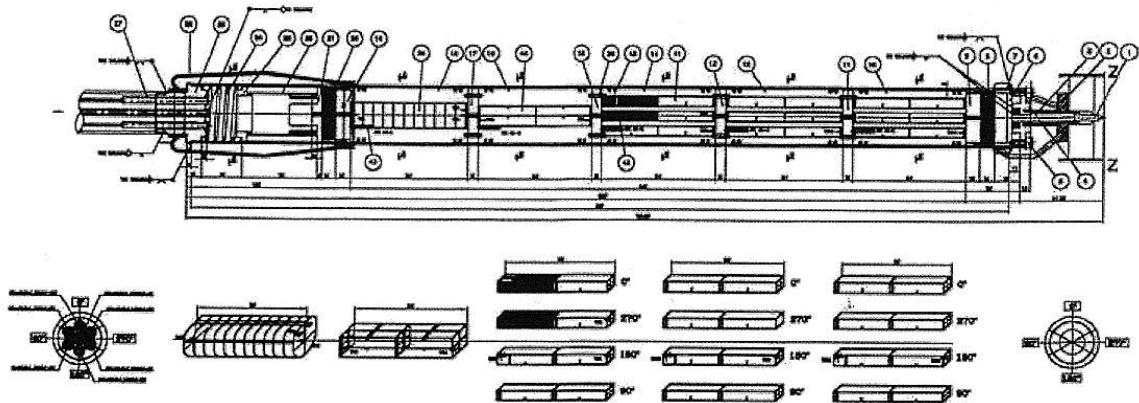


Figura 1.1 Representación de una cápsula de vigilancia con material a ensayar

Desde un punto de vista práctico, esta merma de propiedades del acero de la vasija por efecto de la irradiación neutrónica se traduce en una reducción de los límites de presión y temperatura de operación a lo largo de la vida de la misma. Tradicionalmente, la evolución de la tenacidad del acero de la vasija se ha cuantificado de forma indirecta por medio de ensayos de impacto tipo Charpy. Las correlaciones empíricas entre los resultados de los ensayos Charpy, de carácter dinámico y sobre probetas simplemente entalladas, con la tenacidad a fractura, ensayo cuasi-estático sobre probeta prefisurada, no están justificadas teóricamente y presentan una fuerte dependencia del material para el que fueron obtenidas, es decir, una baja universalidad. Es por ello que su utilización conlleva un alto grado de incertidumbre, lo cual implica, a su vez, la introducción de elevadas cotas de conservadurismo en la determinación de los valores de tenacidad.

A pesar de estas limitaciones, el procedimiento tradicional basado en las curvas de resiliencia (Energía-Temperatura) obtenidas con ensayos de impacto Charpy refleja las diferentes regiones de comportamiento que los aceros de vasija experimentan en función de la temperatura de trabajo. Así, en la Figura 1.2 puede apreciarse cómo la

energía absorbida para la rotura de la probeta varía desde valores reducidos para bajas temperaturas en la región denominada frágil o *Lower Shelf*, hasta altas energías absorbidas en la zona de elevada temperatura, zona dúctil o *Upper Shelf*. Las temperaturas intermedias constituyen la llamada zona de transición dúctil-frágil (ZTDF). De igual forma, la fragilización del material con la irradiación se detecta también en las curvas Charpy, como la Figura 1.3 permite constatar. Los efectos más destacables son un desplazamiento de la curva en la región de transición hacia temperaturas más elevadas acompañado de una reducción en la energía absorbida en el *Upper Shelf*.

El problema descrito de la relación entre ensayos Charpy y de tenacidad es particularmente significativo cuando el material trabaja en la zona de transición dúctil-frágil, en la cual se produce, inevitablemente, una gran dispersión de la tenacidad debido a la naturaleza aleatoria propia de los mecanismos de fractura, clivajes en este caso.

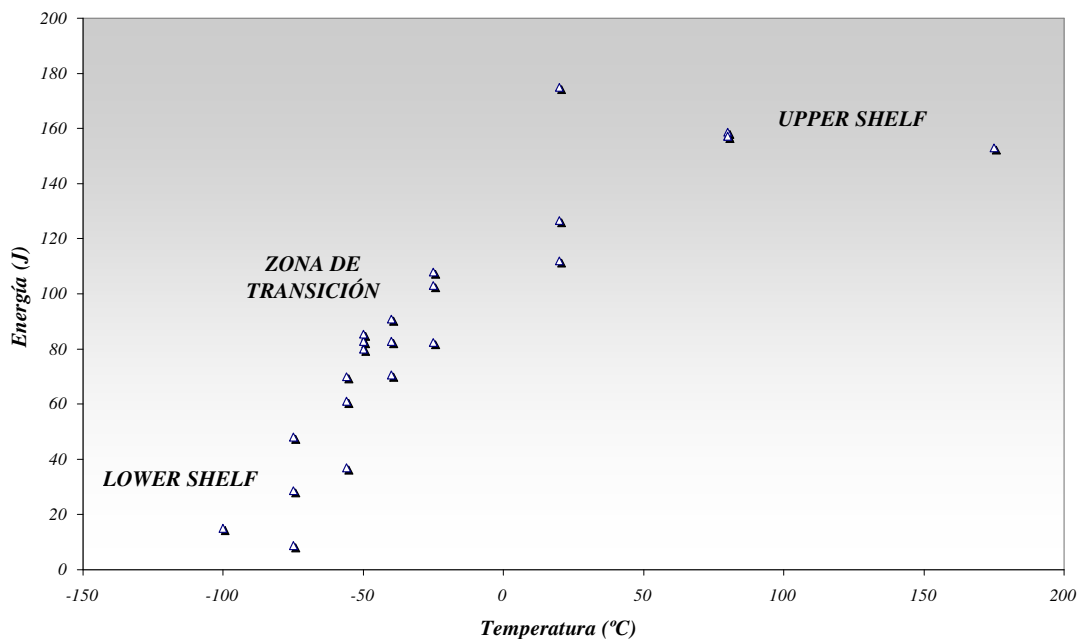


Figura 1.2 Ensayos de resiliencia con las diferentes regiones de comportamiento

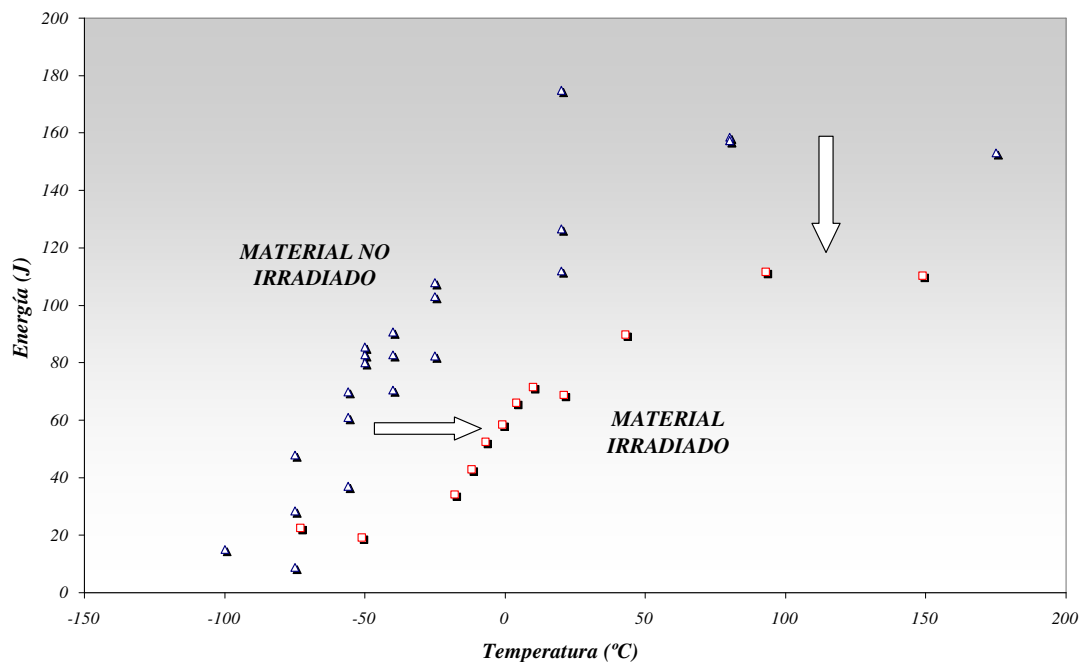


Figura 1.3 Evolución de las curvas Charpy debido a la irradiación

Con el objeto de obtener de forma más realista la tenacidad a fractura, se han desarrollado en los últimos años diversos programas de investigación dirigidos a determinar su valor de manera directa a partir de ensayos propios de tenacidad y no mediante correlaciones indirectas no plenamente justificadas. Entre estos programas cabe destacar el procedimiento de la Curva Patrón (Master Curve) debido a Kim Wallin que consiste en la definición de una temperatura de referencia, T_0 , en la zona de transición dúctil-frágil obtenida mediante el tratamiento estadístico de los ensayos de tenacidad a fractura. Esa temperatura de referencia determina la curva tenacidad – temperatura que se supone idéntica para una gran variedad de aceros entre los cuales se cuentan los de vasija. El procedimiento de ensayo y tratamiento de datos se encuentra recogido en la correspondiente normativa ASTM la cual contempla varias configuraciones experimentales; de entre ellas, las más ampliamente utilizadas han sido las probetas Charpy pre-agrietadas y las probetas compactas, PCCv y CT en lo sucesivo.

1.1.2 Los programas de alargamiento de vida de las centrales

Existe un número importante de centrales nucleares en todo el mundo que, o bien han superado o bien se aproximan, al tiempo de operación para el que fueron diseñadas. Las

necesidades energéticas del presente invitan, sin embargo, a considerar la posible extensión de su vida útil, la cual queda, evidentemente condicionada por el requisito de integridad estructural de todos sus componentes. En particular, el alargamiento del periodo de operación de la vasija demanda de la confección de nuevos Programas de Vigilancia, en los que las probetas utilizadas contengan todo el daño acumulado desde la primera operación de la planta.

Para lograr dicho objetivo, debe tenerse en consideración lo exiguo de las dimensiones de las cápsulas de vigilancia donde las probetas son almacenadas, debido a las limitaciones de espacio en el interior de la vasija. Por ello, la posible reutilización del material ya ensayado en anteriores paradas de recarga adquiere un atractivo particular. Puesto que los ensayos de impacto Charpy han sido los más utilizados en el pasado, se dispone de un gran número de mitades de probetas ya ensayadas, a partir de las cuales, mediante técnicas de reconstrucción podrían fabricarse probetas de tenacidad estática. De este modo podría obtenerse información fidedigna acerca de la evolución de las propiedades del material sin necesidad de correlaciones cuestionables. Por supuesto, se debe exigir en cada caso los pertinentes estudios de cualificación a fin de demostrar que los resultados obtenidos con probetas reconstruidas son consistentes con los procedentes de configuraciones normalizadas.

La reconstrucción de probetas se presenta, pues, como una solución alternativa para la reutilización del material, no exenta de inconvenientes pero con las suficientes ventajas como para ser considerada una posibilidad ciertamente atractiva. En este sentido, en anteriores trabajos se han llevado a cabo estudios exhaustivos para garantizar la validación del proceso de reconstrucción de probetas CT para valores de temperatura de ensayo correspondientes a la zona de comportamiento dúctil.

1.2 *Objetivos de la tesis*

Atendiendo a las consideraciones expuestas en el Apartado 1.1, se pueden distinguir tres objetivos a satisfacer en el presente trabajo. En primer lugar, se aspira a validar las configuraciones de probetas reconstruidas más habituales, PCCv y CT, en la región de temperaturas correspondiente con la zona de transición para un acero de material base, no irradiado, procedente de una vasija española. Esto permite entroncar con el segundo

de los objetivos: obtener una caracterización fidedigna del comportamiento en fractura de este material, en diferentes orientaciones, en dicha región. Ambos fines están interconectados a través de los conceptos de Temperatura de Referencia, T_0 , y Curva Patrón. Por último, habiendo satisfecho los requisitos anteriores, se pretende caracterizar el mismo material en estado irradiado evaluando así la evolución objetiva de propiedades en fractura y comparando este resultado con el que se desprende de los procedimientos clásicos por impacto Charpy. Finalmente, a modo de conclusión, se cuantificará el impacto que la combinación de estas metodologías supone para la extensión de vida de la planta, a través del análisis de integridad estructural de la vasija. La Figura 1.4 recoge un diagrama de flujo que resume las actividades descritas en este documento.

La consecución de los objetivos aquí descritos se organiza en los seis capítulos que conforman este documento. En el Capítulo 2, dedicado al estado del arte, se presenta una descripción pormenorizada de las diversas técnicas analíticas, experimentales y de reconstrucción de probetas empleadas en el contexto de este trabajo. Se incluye asimismo un resumen del estado actual de conocimiento en el campo del efecto nano y microestructural de la irradiación neutrónica sobre los aceros de vasija. El Capítulo 3 se dedica a la metodología experimental y al alcance empírico de la tesis. En él se detalla cuidadosamente el material ensayado, la información previa disponible del mismo así como la finalidad de cada grupo de ensayos. Complementariamente, se describe cada una de las técnicas experimentales utilizadas. El Capítulo 4 contiene los resultados empíricos de relevancia del trabajo aquí desarrollado: aquéllos relacionados con la caracterización del material de una vasija española en la zona de transición y con la evaluación del efecto de la irradiación sobre el mismo. Para finalizar, con el ánimo de ofrecer un ejemplo ingenieril de la utilidad de las herramientas analíticas y experimentales aquí introducidas, se ha desarrollado en el Capítulo 5 un ejemplo de integridad estructural sobre la vasija de la cual procede el material de esta tesis. Este ejercicio proporciona una idea cabal de las ventajas que las nuevas metodologías pueden suponer, sin merma alguna en las condiciones de seguridad de la instalación, en la extensión de vida de las plantas actualmente operativas. Para finalizar, en el Capítulo 6 se resumen los logros alcanzados y se proponen actuaciones complementarias a desarrollar en calidad de trabajo futuro.

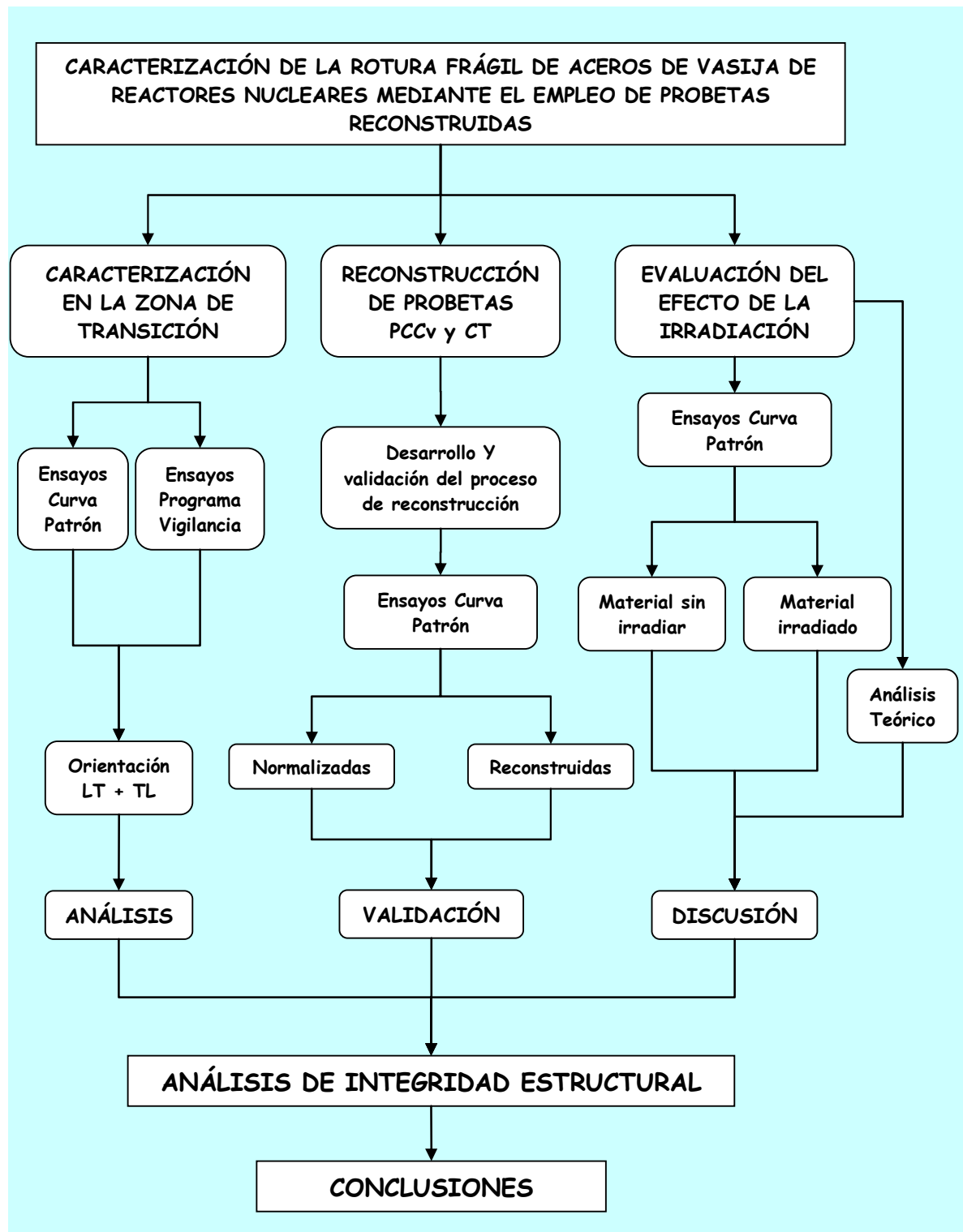


Figura 1.4 Líneas de trabajo desarrolladas en esta tesis

