

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 6 Consideraciones finales

6.1 Introducción

A modo de consideraciones finales, este capítulo se divide en tres partes dedicadas, respectivamente, a resumir los trabajos desarrollados en la tesis, enumerar las aportaciones que en ella se recogen y, finalmente, proponer actuaciones de futuro que completen sus contenidos.

6.2 Resumen de los trabajos desarrollados

En el Capítulo 1 se hace una breve presentación de las principales características de los Programas de Vigilancia de las centrales nucleares, haciendo énfasis en las dificultades que surgen en la caracterización de las propiedades en fractura de los aceros de las vasijas cuando trabajan en la ZTDF. Los objetivos de la tesis, que también se presentan en dicho capítulo, obedecen a la necesidad de desarrollar una metodología mejorada en el proceso de caracterización, optimizando el consumo del escaso material disponible.

A continuación, en el Capítulo 2 se incluye el extenso y completo estado del arte que se ha desarrollado sobre cada una de las herramientas teóricas y tecnológicas que han sido utilizadas en el trabajo. En este sentido, se ha pretendido construir un documento consistente y autorreferenciado en la medida de lo posible, con la intención de evitar que el lector se vea continuamente obligado a consultar otras obras o trabajos durante el proceso de lectura. En todo momento se ha detallado el origen de la información recogida en el texto -la cual se enumera en el Capítulo 7- y, en muchas ocasiones, se ha completado ésta con demostraciones de elaboración propia, nuevamente con el afán de

conseguir un texto consistente. En concreto, el alcance del Capítulo 2 incluye consideraciones en los siguientes ámbitos:

- Se presenta una descripción del fenómeno de la ZTDF así de los modelos convencionales (Código ASME) y alternativos (Curva Patrón) empleados para su tratamiento. Puesto que la Curva Patrón representa la herramienta protagonista en esta tesis, se ha hecho particular hincapié en justificar todas las expresiones relevantes contempladas por este modelo.
- Se expone el efecto de fragilización por fluencia neutrónica experimentado por los aceros de vasija tanto desde un punto de vista puramente fenomenológico como desde una perspectiva nano y microestructural. Se describen, además, los principales modelos predictivos actualmente disponibles para cuantificar el impacto de la irradiación neutrónica sobre la tenacidad de los aceros en la ZTDF.
- Se enumeran y detallan varias técnicas de reconstrucción de diferentes configuraciones de probetas de fractura, con distintos procedimientos de soldadura, destacando sus ventajas e inconvenientes así como las precauciones a tener en consideración en cada caso.
- Se hace un repaso de las técnicas de evaluación de la Integridad Estructural de componentes que propone, por un lado, la normativa vigente (Código ASME y diferentes *Code Case*) y, por el otro, el nuevo procedimiento FITNET de Integridad Estructural.

En el Capítulo 3 se incluye una recopilación de la información disponible sobre las propiedades de los dos aceros estudiados en la tesis, denominados “material complementario” y “material de interés”, respectivamente. El primero de ellos ha sido empleado para validar la técnica experimental de la Curva Patrón, contrastando los resultados obtenidos sobre probetas CT 0.4T reconstruidas (soldadura EBW) con los que ofrece la literatura consultada. Sobre el material de interés, que procede del Programa de Vigilancia de una central nuclear española actualmente en servicio, se ha practicado una caracterización en fractura de las orientaciones LT y TL en la ZTDF por medio de la Curva Patrón, tanto en estado virgen como ligeramente irradiado; debe mencionarse que es la primera ocasión en que esta técnica es empleada sobre acero de

una vasija española. Se han ensayado probetas PCCv convencionales así como probetas PCCv reconstruidas (soldadura ASW) y probetas CT 0.4T reconstruidas (soldadura EBW).

Los resultados del proceso experimental en ambos materiales se recogen en el Capítulo 4. Allí puede localizarse, además, un análisis de la influencia potencial de las variables del proceso de reconstrucción sobre la Temperatura de Referencia, T_0 . Otros aspectos estudiados se refieren a la comparación de las propiedades en fractura en función de la orientación del material, LT o TL, a la cuantificación del efecto de la irradiación o a la influencia de la configuración de probeta empleada, PCCv o CT. Finalmente, se ha caracterizado la tenacidad dinámica del material por medio de ensayos de impacto Charpy sobre probetas PCCv prefisuradas.

Finalmente, en el Capítulo 5 se desarrolla un análisis de Integridad Estructural de la vasija aquí estudiada. En concreto se analizan los transitorios térmicos de calentamiento y enfriamiento y se obtienen las curvas p-T correspondientes por medio de los métodos convencionales de análisis. Por otra parte, se ha efectuado un estudio comparativo entre, por un lado, las metodologías clásicas (Código ASME y sus *Code Case*) y, por el otro, herramientas que incorporan la Curva Patrón, como, por ejemplo, el procedimiento FITNET. Como último ejercicio, se ha incorporado un estudio de las posibles sollicitaciones de naturaleza dinámica que pueden afectar a la vasija.

6.3 Aportaciones contenidas en la tesis

El trabajo aquí recogido constituye un estudio total en el sentido de que contempla tanto la obtención de valores experimentales como el desarrollo de cálculos estructurales, incluyendo consideraciones propias de la operación de reactores nucleares.

Por comodidad, las aportaciones pueden agruparse en dos contextos diferentes: el de la caracterización de la tenacidad a fractura en la ZTDF por medio de la Curva Patrón empleando probetas reconstruidas, y el del análisis de la Integridad Estructural de una vasija ante transitorios térmicos.

6.3.1 En la caracterización de materiales

De forma resumida, pueden mencionarse las siguientes aportaciones:

- Se ha caracterizado, por primera vez, el comportamiento en fractura de un acero de una vasija española en servicio con la metodología de la Curva Patrón, tanto en estado virgen como ligeramente irradiado. El material irradiado procede de una cápsula de vigilancia especialmente acondicionada por la planta para la ejecución de este trabajo.
- Se han validado dos configuraciones de probetas reconstruidas: las probetas PCCv con implante de 10 mm y soldadura ASW y las probetas CT 0.4T con soldadura EBW, descartando la existencia de efectos espurios relacionados con el proceso de reconstrucción.
- Se ha detectado en el material de vasija española la existencia de un sesgo sistemático entre los valores de Temperatura de Referencia T_0 procedentes de probetas PCCv y probetas CT, ofreciendo éstas últimas resultados más conservadores. Este hecho es coherente con otros resultados experimentales procedentes de la literatura.
- Se ha puesto de manifiesto que las diferencias en tenacidad entre las orientaciones LT y TL que aparecen a nivel de USE, no se manifiestan en el rango de temperaturas correspondiente con la ZTDF, tanto desde la perspectiva de los ensayos de impacto Charpy como desde el punto de vista de la Temperatura de Referencia T_0 .
- La caracterización del efecto de fragilización por irradiación neutrónica obtenida por medio de la Curva Patrón ha ofrecido resultados coherentes tanto con los procedentes de los métodos convencionales de caracterización (basados en las curvas de impacto Charpy) como con los modelos predictivos teóricos.
- Se ha cuantificado la influencia de la velocidad de sollicitación sobre la tenacidad del material en la ZTDF, orientación LT, contrastando el resultado con las

predicciones de un modelo semi-teórico propuesto recientemente. En este contraste se ha obtenido un buen nivel de acuerdo entre experiencia y modelo.

6.3.2 *En el análisis de Integridad Estructural*

Pueden enumerarse las siguientes aportaciones:

- Se ha propuesto una metodología analítica para la resolución de situaciones termo-mecánicas en la vasija del reactor aglutinando, de forma coherente, diversas herramientas proporcionadas por la literatura (análisis dinámico convencional, transmisión de calor y elasticidad lineal). Se trata de un método simplificado para resolver un problema complejo.
- Esta metodología ha quedado validada por dos vías: en primer lugar, por comparación con un ejemplo estructural resuelto en la bibliografía y, en segundo lugar, por medio de un modelo de Elementos Finitos.
- Se ha obtenido el transitorio térmico pésimo de acuerdo con la normativa vigente.
- Se ha realizado un estudio comparativo en el que se han obtenido las curvas p-T en el escenario pésimo por diversas metodologías, tanto clásicas (Código ASME y sus *Code Case*), como alternativas. En particular, se ha hecho uso del procedimiento FITNET de Integridad Estructural, de reciente desarrollo, el cual incorpora plenamente el concepto de Temperatura de Referencia T_0 para la resolución de problemas de iniciación del fallo en la ZTDF. Este ejercicio ha permitido cuantificar el gran conservadurismo inherente en las técnicas convencionales de caracterización de la ZTDF.
- Se ha practicado un análisis evaluando el impacto de las posibles solicitaciones de tipo dinámico originadas por transitorios térmicos en la vasija. Los resultados obtenidos han permitido descartar la existencia de solicitaciones de suficiente entidad dinámica como para modificar las propiedades en fractura del material constitutivo.

6.4 Trabajo futuro

A la luz del trabajo realizado en esta tesis, pueden enumerarse una serie de actividades para complementar sus contenidos. Son las siguientes:

- En esta tesis se ha caracterizado el material base de una vasija española. Resulta natural extender las técnicas aquí expuestas y validadas al material constitutivo de las soldaduras circunferenciales de los diversos anillos, en la región *beltline*.
- Sería recomendable caracterizar, tanto material base como de soldadura, con un nivel de fluencia más elevado, coherente con las previsiones de fluencia a fin de vida. De esta forma, se podría efectuar una comparación con mayor criterio entre los procedimientos convencionales y alternativos de caracterización en la ZTDF, así como con los modelos predictivos.
- Realizar un ejercicio de Integridad Estructural de la vasija en base a la caracterización mencionada en el punto anterior. En esta línea, sería aconsejable extender el ámbito de aplicación de las herramientas de Integridad Estructural a regiones de la vasija diferentes de la *beltline*.
- Mejorar la calidad del análisis de Integridad Estructural, teniendo en consideración las condiciones reales de confinamiento de una fisura presente en la vasija, empleando, por ejemplo, los FAD modificados que recoge el procedimiento FITNET.
- Incrementar el aprovechamiento del material disponible por medio de ensayos sobre probetas de dimensiones todavía más reducidas que las contempladas en este trabajo, ya sean de geometría normalizada en la Mecánica de Fractura (CT, PCCv, ...) o alternativas no estándar. En este sentido, el ensayo *small-punch* se revela como una interesante alternativa de futuro.
- Desde el punto de vista de un usuario que practica un análisis de Integridad Estructural sobre una vasija (por ejemplo, obteniendo las curvas p-T), lo ideal sería disponer de una herramienta unificada y coherente que permitiera realizar un análisis puramente probabilista, imputando las correspondientes incertidumbres sobre cada uno de los fenómenos que participan en el proceso. El método de la

Curva Patrón satisface este requisito en lo que a la descripción del comportamiento en la ZTDF se refiere. Sin embargo, en los trabajos de análisis desarrollados en esta tesis se han asumido algunas hipótesis deterministas que, en primera instancia, pueden cuestionarse. Por ejemplo, se ha considerado en todo momento el defecto postulado por el Código ASME junto como las expresiones allí propuestas para el factor de intensidad de tensiones. Un estudio probabilista como el arriba propuesto, debiera considerar una población de fisuras, con diferentes geometrías y tamaños, asignando probabilidades en base a la información experimental acumulada. Complementariamente, las técnicas de análisis numérico por Elementos Finitos pueden incorporarse en el proceso, al permitir determinar fácilmente el valor del factor de intensidad de tensiones a lo largo de dichas fisuras de geometría variable.

- Evaluar las mejoras que las técnicas recogidas en esta tesis, tanto en el ámbito de la caracterización como en el del análisis, suponen de cara a la posible extensión de vida de la planta. La expresión de este cambio metodológico en términos de años adicionales de operación de la vasija debe representar el parámetro más objetivo para cuantificar el conservadurismo implícito en los métodos convencionales.

