

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA CURVA PATRÓN A LOS PROGRAMAS DE VIGILANCIA DE VASIJA

J. MARTÍN - J. M^a FIGUERAS - C. MENDOZA - R. VINYES - D. FERREÑO -
M. SCIBETTA - A. BALLESTEROS - L. FRANCIA

Los programas de vigilancia de vasija se establecieron en su origen para monitorizar un período de vida de 40 años. Las mejoras de las técnicas de ensayo de los materiales y de las metodologías de evaluación de los materiales fragilizados por irradiación, que lentamente se van incorporando en los códigos y normas, aconsejan introducir modificaciones a los programas de vigilancia y acometer actividades de investigación que permitan realizar una evaluación más precisa de la integridad estructural de la vasija de cara a una posible operación a largo plazo, como por ejemplo a los 60 años. Con este objetivo, la metodología más prometedora es la denominada "Curva Patrón" (Master Curve), que permite la utilización de probetas de pequeño tamaño para determinar la tenacidad a la fractura del material irradiado. Este artículo recoge los resultados del proyecto de investigación CUPRIVA, centrado en el desarrollo de técnicas de reconstrucción de probetas y en la implementación de la metodología de la curva patrón.

Standard reactor pressure vessel (RPV) surveillance programmes are established to monitor the RPV design life, usually 40 calendar years of reactor operation. During this monitoring period improvements in material testing and in radiation embrittlement evaluation methodologies, which are slowly incorporated in the regulations, make necessary, or at least advisable, to introduce modifications in the original surveillance programme and to initiate research activities that allow, all together, a more precise RPV integrity evaluation facing a possible long term operation of the plant, for instance to 60 years. With this objective, the most promising approach is the so called "master curve", that allows the use of small specimens to determine the fracture toughness of irradiated RPV steels. This article presents the results obtained in the CUPRIVA project, focussed on the development of specimen reconstitution techniques and the implementation of the master curve methodology.

INTRODUCCIÓN

Con objeto de asegurar la integridad de los componentes de la barrera de presión del refrigerante del reactor el

Apéndice G del 10CFR50 [1] establece los requisitos de tenacidad a la fractura que deben poseer los materiales ferríticos que forman parte de dicha barrera. En el caso del material de la vasija del reactor estos requisitos revisten un carácter especial debido al proceso de fragilización por efecto de la irradiación neutrónica que experimenta a lo largo de su vida útil.

Con objeto de hacer un seguimiento del estado del acero de la vasija y poder predecir con suficiente antelación el daño causado por la irradiación debe llevarse a cabo un programa de vigilancia en el que se retiran y analizan, a determinados intervalos, cápsulas que contienen muestras representativas de las zonas críticas de la vasija del reactor.

Hasta la fecha, los resultados de mayor interés provenían de los ensayos con probetas Charpy incluidas en las cápsulas de vigilancia, ya que permiten obtener la temperatura de referencia RTNDT, que caracteriza la resistencia a la fractura frágil de los materiales ferríticos. A partir de este parámetro puede evaluarse la tenacidad a la fractura mediante el uso de correlaciones conservadoras (metodología ASME [2]). Una de las limitaciones de esta metodología consiste en la dificultad de obtener valores directos de tenacidad a la fractura con probetas de pequeño tamaño como las disponibles en los programas de vigilancia actuales.

Recientemente se ha desarrollado una nueva metodología, denominada Curva Patrón (Master Curve) [3], que permite determinar la tenacidad del material de la vasija basándose en resultados de ensayos de tenacidad a la fractura con probetas de pequeño tamaño, tales como probetas Charpy pre-agrietadas de dimensiones estándar así como probetas reconstruidas.

Este artículo recoge las actividades y los resultados más significativos del proyecto de investigación CUPRIVA, centrado en la aplicación de la metodología de la Curva Patrón en el estudio de la integridad de la vasija y su impacto en la operación del reactor (curvas límite de operación presión temperatura). El proyecto se ha desarrollado en colaboración, siendo las organizaciones ejecutoras Tecnatom, el Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad de Cantabria (LADICIM), y el laboratorio belga SCK•CEN. El proyecto ha sido dirigido por UNESA y el CSN, y las centrales nucleares de Santa María de Garoña y Ascó. La financiación se enmarca dentro del programa de investigación coordinado PCI de UNESA-CSN.

PROGRAMA DE TRABAJO

Las centrales nucleares de Santa M^a de Garoña y Ascó II disponen de material irradiado y ensayado, procedente

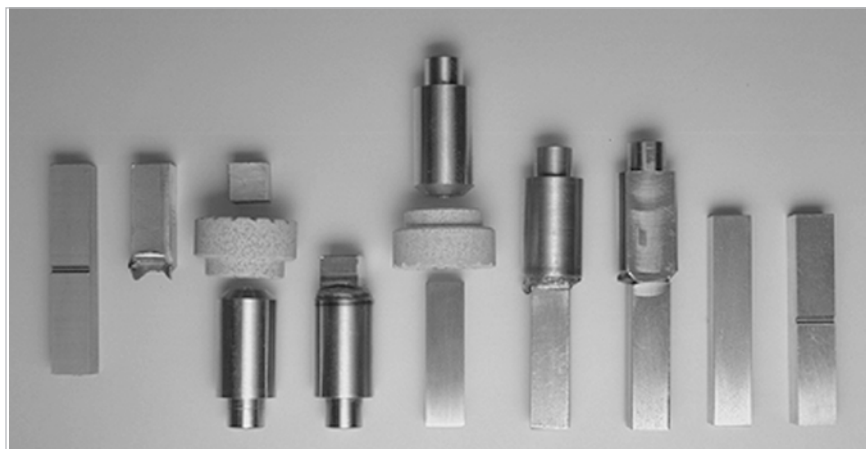


Figura 1: Proceso de reconstrucción de probetas Charpy preagrietadas.

de las cápsulas del programa de vigilancia de vasija ya extraídas y analizadas, que ha sido reutilizado para los ensayos requeridos en este proyecto. Adicionalmente se ha utilizado material de una cápsula de investigación irradiada en la CN Santa Mª de Garoña durante los ciclos 19 a 21.

El proyecto CUPRIVA ha abarcado principalmente las siguientes actividades:

- Recuperación y el transporte del material de vigilancia irradiado.
- Validación de la técnica de reconstrucción de probetas para ensayos mecánicos.
- Reconstrucción de probetas tipo PCCv (probetas Charpy prefisuradas) y CT (probetas compactas) de CN Ascó II y Santa Mª de Garoña.
- Ensayos mecánicos: Microdureza, tracción, Charpy-V y tenacidad a la fractura (master curve).
- Análisis de los dosímetros de la cápsula de investigación, y realización de cálculos de flujo y fluencia neutrónica en cápsula y en vasija.

- Aplicación de los resultados de los ensayos. Análisis de la integridad de las vasijas de CN Ascó II y Santa Mª de Garoña, e impacto en la operación.

RECONSTRUCCIÓN DE PROBETAS

Uno de los principales logros del proyecto CUPRIVA ha sido la validación del proceso de reconstrucción de probetas PCCv y CT para la realización de ensayos de tenacidad a la fractura [4].

RECONSTRUCCIÓN DE PROBETAS PCCv

En la figura 1 se muestra el proceso de reconstrucción de probetas PCCv, que se realizó y validó mediante Arc Stud Welding (ASW) [5].

Las dos geometrías validadas mediante esta técnica son:

- Probetas PCCv de Ascó II con implantes de 24 mm.
- Probetas PCCv de Santa Mª de Garoña con implantes de 10 mm.

La temperatura máxima medida en el centro del implante no superó los 260° C, de manera que se descartó el riesgo de degradación de las propiedades mecánicas del material durante el proceso de reconstrucción.

RECONSTRUCCIÓN DE PROBETAS CT

La geometría validada en este caso fue la CT con implantes de 24 mm utilizando material de vigilancia de Santa Mª de Garoña. Por un lado, esta geometría no permite el uso de la técnica de soldadura ASW y, por otro lado, la normativa de ensayo exige que la relación a/W entre la prefisura de fatiga y el ancho de la probeta esté comprendida en el intervalo (0.45-0.55). Este requisito no resulta factible en el caso de las CT reconstruidas ya que, en tales condiciones, la zona de proceso de fractura, donde se desarrollan los mecanismos que conducen a la misma, se ubicaría de pleno en la interfaz entre el material de interés -el implante- y los soportes, en la región correspondiente a la soldadura y zona afectada térmicamente, ZAT (figura 2).

Para minimizar el espesor de esta región las probetas CT fueron reconstruidas mediante soldadura por haz de electrones (EBW) que constituye la técnica más eficaz en este sentido.

En cualquier caso, para soslayar este inconveniente, las CT reconstruidas se prefisuraron por encima del límite impuesto por la norma ya que en trabajos anteriores se ha demostrado que esta disposición no afecta a la representatividad de los resultados de T_0 obtenidos.

Con el fin de garantizar que la fisura llegara a introducirse plenamente en el material del implante, se realizó una campaña de microdurezas para establecer claramente la región fragilizada correspondiente al material fundido y la región contigua, afectada térmicamente y potencialmente recocida (figura 3). Finalmente, se estableció el valor $a_0=12.2$ mm como la longitud de fisura óptima para las probetas CT con implantes de 24 mm.

ENSAYOS MECÁNICOS

Se han realizado ensayos de tracción, dureza y tenacidad a la fractura. Los ensayos del material no irradiado fueron realizados por LADICIM mientras que los del material irradiado fueron acometidos por SCK•CEN. Los resultados de los ensayos se completaron con los del programa de vigilancia de

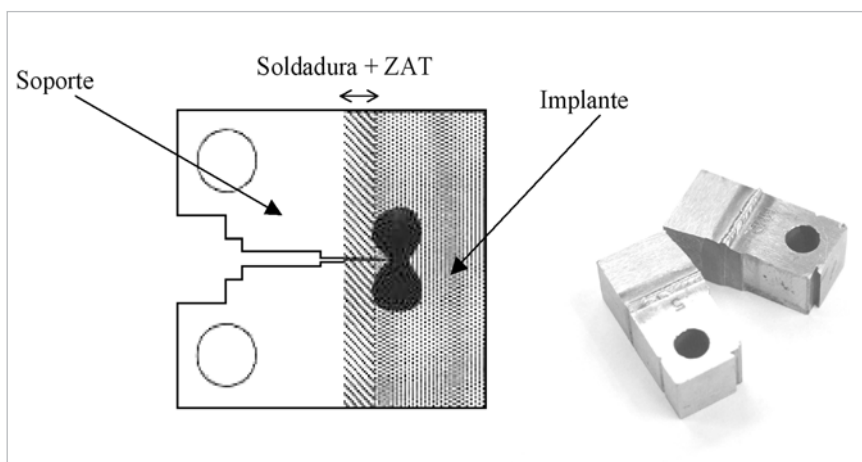


Figura 2: Zona afectada térmicamente (ZAT) por el proceso de reconstrucción.

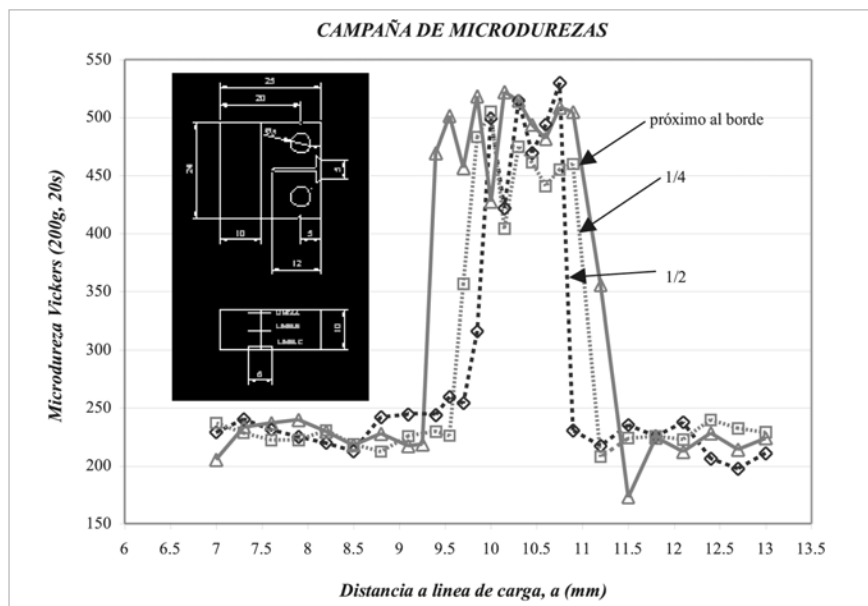


Figura 3: Estimación de la longitud de la prefisura por medio de microdurezas.

Tabla 1: Resultados finales de T_0 ($^{\circ}\text{C}$) $\pm 2\sigma$

ASCÓ II (PWR)		Estándar	Reconstruidas	
		CT	PCCv	
Irradiado ($4.05 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$)	Base	-36 ± 18 (4T)	-52 ± 10 (15 TL)	
GAROÑA (BWR)		Estándar	Reconstruidas	
		PCCv	PCCv	CT
No irradiado	Base	-105 ± 11 (15 LT)	-95 ± 10 (13 LT) -104 ± 11 (15 TL)	-89 ± 15 (13 LT)
	Soldadura	-95 ± 10 (15 T)		
Irradiado ($3.55 \cdot 10^{17} \text{ n/cm}^2$)	Base	-91 ± 11 (11 LT)	-93 ± 10 (14 LT) -93 ± 10 (15 TL)	-84 ± 11 (11 LT)
	Soldadura	-107 ± 11 (12 T)		

LT: probetas orientadas en la dirección longitudinal o de laminación.
TL: probetas orientadas en la dirección transversal.

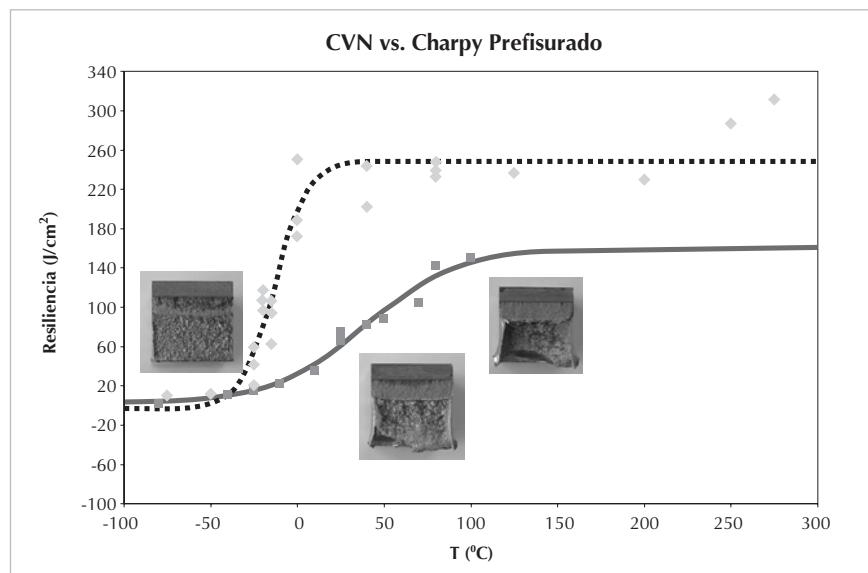


Figura 4: Comparación de las curvas de impacto Charpy con probetas entalladas (••••) y prefisuradas (—).

ambas centrales, obtenidos de las cápsulas 1 y 2 de CN Santa M^a de Garoña y las cápsulas U, V y X de CN Ascó II.

ENSAYOS DE TENACIDAD A LA FRACTURA

Se han realizado un total de 154 ensayos de tenacidad a la fractura en probetas PCCv y CT, estándar y reconstruidas, procedentes de la cápsula de investigación del proyecto CUPRIVA, del material correspondiente no irradiado y de la cápsula X del programa de vigilancia de CN Ascó II. Los ensayos se realizaron siguiendo la norma ASTM E1921 [6].

Gracias a estos ensayos se ha podido caracterizar la tenacidad de los aceros de vasija de las centrales objeto de estudio en la zona de transición dúctil-frágil mediante el parámetro T_0 de la Curva Patrón (tabla 1). Además, se ha podido evaluar el efecto de la irradiación, la reconstrucción, el tipo y la orientación de las probetas ([7],[8]).

Como resultado de este análisis se ha confirmado que, para las geometrías validadas en este proyecto, no existe un efecto apreciable de la reconstrucción para la determinación de T_0 (las diferencias se encuentran por debajo de los márgenes asociados a la determinación de T_0).

ENSAYOS DE IMPACTO DINÁMICO

Para complementar los resultados de los ensayos Charpy de los programas de vigilancia de ambas centrales se ha seleccionado parte del material (15 probetas de material base no irradiado, orientación LT, de CN Santa M^a de Garoña) para proceder a su caracterización en régimen dinámico. El objetivo era comparar los resultados de ensayos con probetas entalladas con los obtenidos utilizando probetas prefisuradas. Estos últimos son más representativos de un posible defecto que se localizase en la pared de la vasija.

En la figura 4 se comparan los resultados de las curvas de resiliencia obtenidas con probetas prefisuradas y probetas entalladas. Se puede apreciar que las curvas de resiliencia obtenidas con probetas prefisuradas ofrecen valores energéticos más bajos que las curvas de probetas entalladas en la región de transición y en la zona dúctil, debido a que el término energético consumido en el proceso de iniciación de la grieta desaparece, quedando únicamente las etapas de propagación y desgarro final. Este efecto se debe tener en cuenta para caracterizar el comportamiento de

Tabla 2: Comparación entre los valores RT_{To} y RT_{NDT} (°C) en los distintos espesores de las vasijas objeto de estudio

40 años (32 EFY)						
	OT		1/4T		3/4T	
MATERIAL	RT_{NDT}	RT_{To}	RT_{NDT}	RT_{To}	RT_{NDT}	RT_{To}
Garofa Base	16.0	-32.9	16.0	-35.2	16.0	-40.9
Garofa Soldadura	43.5	-9.0	34.7	-12.6	18.7	-22.5
Ascó 2 Base	41.5	-20.5	39.3	-26.1	34.2	-33.7

60 años (54 EFY)						
	OT		1/4T		3/4T	
MATERIAL	RT_{NDT}	RT_{To}	RT_{NDT}	RT_{To}	RT_{NDT}	RT_{To}
Garofa Base	16.0	-29.2	16.0	-31.9	16.0	-38.0
Garofa Soldadura	54.7	-1.9	45.3	-5.5	28.1	-14.4
Ascó 2 Base	43.7	-11.8	42.0	-19.0	37.5	-29.4

un componente estructural en el que exista una fisura y que reciba una sollicitación súbita, asimilable a un impacto.

Estos ensayos de impacto instrumentados también han servido para obtener una estimación del valor de T_0 del material estudiado en régimen dinámico, el cual resultó ser de -25 °C. Esta temperatura supone un desplazamiento de 80 °C respecto a su correspondiente valor en régimen estático, lo cual está de acuerdo con la bibliografía consultada.

ANÁLISIS DOSIMÉTRICOS Y CÁLCULOS DE FLUENCIA NEUTRÓNICA

Se han llevado a cabo medidas de las actividades de los dosímetros irradiados en Santa Mª de Garofa. La información aportada por estos dosímetros, junto con los cálculos de transporte neutrónico realizados por Tecnomat [9] han permitido determinar la fluencia neutrónica recibida por las probetas irradiadas y la pared de la vasija a diferentes espesores (OT, 1/4T y 3/4T).

Los resultados de los ensayos de las probetas irradiadas utilizadas en el proyecto se corresponden con valores de fluencia neutrónica que son inferiores a los valores de fluencia que se estiman recibirán las vasijas objeto de estudio a final de su vida útil. Para realizar el estudio de integridad de vasija y determinar el impacto en la operación del reactor, es necesario extrapolar los resultados de los ensayos a fluencias que se correspondan con los 40 y 60 años de operación. Para el caso de CN Santa Mª de Garofa no solo se han realizado en el proyecto cálculos de fluencia para la vasija y la cápsula de investigación para el periodo de irradiación de ésta (ciclos 19-21), sino que

adicionalmente se realizaron cálculos para los periodos anteriores (ciclos 1-18) y posteriores (22 en adelante) al periodo de irradiación de la cápsula.

La metodología seguida para la determinación de la fluencia neutrónica se basa en dos tipos de cálculos diferentes:

- Cálculos teóricos: realizados tanto en la cápsula como en la vasija, mediante el código MCNP-4C [10], basado en el método de Montecarlo.
- Cálculos experimentales: realizados sólo en la cápsula de investigación, mediante el programa FLATO [11], a partir de la actividad medida en los dosímetros.

Tras obtener los valores de flujo neutrónico teórico y experimental, se procedió a comparar ambos resultados y corregir los valores teóricos con el valor experimental de flujo neutrónico dosimétrico.

APLICACIÓN A LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA VASIJAS Y A LA OPERACIÓN DEL REACTOR

En el proyecto se ha desarrollado una metodología [12] que permite extrapolar los resultados obtenidos en los ensayos (T_0 en las probetas) a las condiciones de interés para el análisis de integridad (T_0 en la vasija a 40 y 60 años). Esto ha permitido, de acuerdo con el ASME Code Case N629, cuantificar la tenacidad a la fractura de los materiales de la vasija mediante el parámetro RT_{To} .

El ASME Code Case N629 permite utilizar los beneficios de la metodología de la Curva Patrón e introduce un nuevo parámetro RT_{To} ($= T_0 + 19$ °C) que conlleva márgenes de seguridad equivalentes a los proporcionados por

la metodología ASME cuando se utiliza el parámetro RT_{NDT} .

En la tabla 2 se comparan los valores de RT_{To} con los de RT_{NDT} calculados a 40 y 60 años en distintos espesores, en los materiales más limitativos de las vasijas de ambas centrales.

Todos estos valores verifican los criterios establecidos por la normativa vigente para evitar el fallo frágil de la vasija, referentes al valor máximo permitido para la temperatura de referencia durante la vida del reactor. En cualquier caso, los valores de RT_{To} obtenidos por la Curva Patrón constatan que las previsiones de la metodología tradicional de ASME para el análisis de la integridad estructural de la vasija resultan ampliamente conservadoras.

Se ha constatado en el proyecto que, para los casos analizados, tanto la aplicación de la metodología Master Curve como del ASME Code Case N629 supone una relajación de las curvas límite de operación presión temperatura.

Recientemente se ha desarrollado un procedimiento europeo de evaluación de la integridad estructural de estructuras fisuradas, SINTAP [13]. Se han calculado las curvas límite de operación presión temperatura mediante dicho procedimiento [14], y se ha realizado una análisis comparativo con los resultados que se obtienen por el resto de las metodologías. Como resultado de este análisis se ha constatado que la metodología SINTAP también supone un relajamiento de las curvas límite de operación de la zona envolvente del núcleo con respecto a la metodología ASME. De hecho, las curvas así obtenidas proporcionan un margen mayor que las resultantes de aplicar el ASME Code Case N629 o la Curva Patrón.

En la figura 5 se han representado, a modo de ejemplo, las curvas límite de enfriamiento obtenidas mediante la metodología ASME, Master Curve (banda de confianza del 1%), ASME Code Case N629 y SINTAP.

CONCLUSIONES

El proyecto CUPRIVA ha permitido caracterizar la tenacidad a la fractura de los aceros de las vasijas de las CCNN Ascó II y Santa Mª de Garofa, a partir de los resultados de los ensayos realizados sobre probetas normalizadas y reconstruidas de ambas centrales. Durante el mismo, se han validado dos procesos de reconstrucción en probetas PCCv y CT y se han realizado medidas directas de la tenacidad mediante el parámetro T_0 , en contraste con el procedimiento tradicional basado en los resultados del ensayo de impacto Charpy.

SINTAP-OTROS PROCEDIMIENTOS

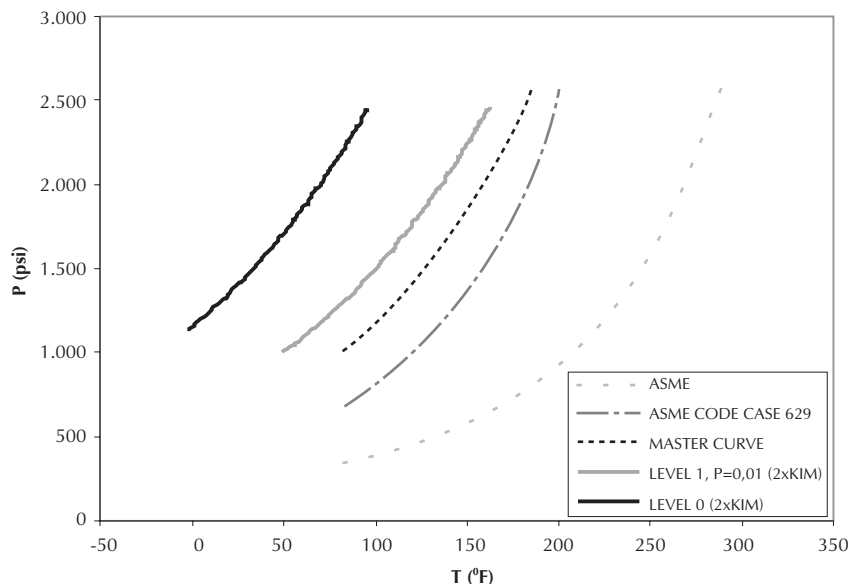


Figura 5: Curva límite de enfriamiento según metodología ASME, Master Curve (1%), ASME Code Case N629 y SINTAP.

Por otra parte, se ha desarrollado una metodología de análisis de la integridad estructural de la vasija basada en la Curva Patrón, lo cual representa un paso importante para la implantación de esta metodología en las centrales nucleares españolas.

De los trabajos experimentales realizados en el proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La similitud de resultados obtenidos con probetas estándar y con probetas reconstruidas confirma la aptitud de los procesos de reconstrucción empleados para la obtención del parámetro T_0 . Las dos geometrías validadas son, para el material procedente de Santa María de Garoña, la PCCv con implante de 10 mm y la CT con implante de 24 mm y, para el caso del material de Ascó II se ha validado la geometría PCCv con implante de 24 mm.

- Adicionalmente:

- Se ha constatado que los valores de T_0 obtenidos a partir de probetas CT resultan ligeramente más conservadores que los que proceden de probetas PCCv ($\approx 10^\circ\text{C}$).

- Se han ensayado probetas PCCv del material base de Santa M^a de Garoña, irradiado y no irradiado, tipo estándar de orientación LT y reconstruidas de orientaciones LT y TL. Ni en el material irradiado, ni en el sin irradiar, se aprecian diferencias significativas entre los valores de T_0 obtenidos en la orientación LT y TL.

- En todos los casos los valores de T_0 obtenidos han resultado inferiores a su

valor de RT_{NDT} correspondiente.

Por otro lado, de los análisis de integridad estructural se concluye:

- Las predicciones de fragilización por irradiación neutrónica para los aceros de las vasijas de CN Santa M^a Garoña y de CN Ascó II a 40 y 60 años indican, en base a los resultados del proyecto CUPRIVA y a los datos de vigilancia disponibles hasta la fecha, que ambas centrales pueden operar con seguridad frente a la fractura frágil hasta los 60 años de operación. Es más, los cálculos indican la existencia de cierto margen adicional sobre el periodo señalado.

- Se ha evaluado el impacto de la aplicación de diferentes metodologías (ASME, Master Curve, ASME Code Case N629 y SINTAP) en la elaboración de las curvas límite de operación presión temperatura de CN Santa M^a de Garoña, concluyendo que cualquiera de ellas supondría una relajación de las curvas límite de operación de calentamiento y enfriamiento para la zona envolvente del núcleo. O dicho de otra forma, las curvas límite de operación actuales incluyen márgenes de seguridad adicionales a los requeridos.

RECONOCIMIENTOS

Se desea expresar el reconocimiento por su aportación y dedicación a la realización del Proyecto CUPRIVA y de este artículo a Iñaki Gorrochategui (NUCLENOR), Federico Gutiérrez Solana (LADICIM), Eric van Walle (SCK-CEN) y Xavier Jardí (TECNATOM), cuya

colaboración ha sido inestimable para el desarrollo y enriquecimiento de los trabajos realizados.

REFERENCIAS

- [1] Code of Federal Regulation, Title 10, Part 50, Appendix G: "Fracture Toughness Requirements for Protection Against Pressurised Thermal Shock Events".
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Appendix G: "Protection against nonductile failure".
- [3] S.T. Rosinski, W.L. Server, S. Byrne, K. Yoon and R. Lott, "Application of Master Curve fracture toughness methodology for ferritic steels", EPRI report TR-108390, April 1998.
- [4] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-06/0704 "Reconstitution of Specimens within CUPRIVA Project".
- [5] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-05/1003 "Qualification of the Arc Stud Welding Reconstitution Procedure".
- [6] ASTM E1921-03 "Test method for the determination of reference temperature, T_0 , for ferritic steels in the transition range", Annual book of ASTM standards" Section 3 Vol. 03.02 Metals test Methods and analytical procedures, 2004.
- [7] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-08/1204 "SCK•CEN Contribution to the CUPRIVA Project. Final Report".
- [8] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-09/1204 "Participación técnica y experimental del LADICIM en el proyecto CUPRIVA. Informe final".
- [9] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-03/0704 "Cálculo de flujo neutrónico. CN Santa M^a de Garoña".
- [10] LA-13709-M, "MCNP4C, A Monte Carlo N-Particle Transport Code System", Los Alamos National Laboratory.
- [11] Manual del programa FLATO, Rev 0. "Un programa de cálculo para la determinación de la fluencia neutrónica a partir de la medida de la actividad de una sonda dosimétrica sometida a irradiación". J. Peña Gutiérrez.
- [12] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-07/1204 "Análisis de resultados: Integridad de la vasija a 40 y 60 años e impacto en las curvas P-T".
- [13] SINTAP, Structural Integrity Assessment Procedures For European Industry, Final Procedure, November 1999.
- [14] Informe técnico del proyecto CUPRIVA ES12/IT-10/1204 "Participación del LADICIM en el estudio analítico de obtención de las curvas límite de operación de la vasija según el procedimiento SINTAP".

Javier Martín (Nuclenor),
José M^a Figueras (CSN),
Carlos Mendoza (CSN),
Rafael Vinyes (ANAV),
Diego Ferreño (LADICIM, Universidad de Cantabria),
Marc Scibetta (SCKoCEN),
Antonio Ballesteros (Tecnatom),
Lorenzo Francia (UNESA)