

# LA TEMPERATURA DE REFERENCIA ( $RT_{NDT}$ ) COMO CRITERIO DE PREVENCIÓN DE ROTURA FRÁGIL EN COMPONENTES FERRÍTICOS DE LA BARRERA DE PRESIÓN DEL REFRIGERANTE EN REACTORES NUCLEARES DE AGUA LIGERA

A. Tanarro Aparicio

TECNATOM, S.A., Km. 19, Ctra. N. I Madrid-Irún.  
San Sebastián de los Reyes (MADRID)

En el presente trabajo se pretende realizar una somera descripción de la utilización actual de la Temperatura de Referencia de Ductilidad Nula ( $RT_{NDT}$ ) como parámetro de seguridad para prevenir la rotura frágil en los componentes ferríticos de la barrera de presión del refrigerante en reactores nucleares de agua ligera.

Primero mencionamos la normativa que referencia a la  $RT_{NDT}$  y a continuación resumimos los criterios de definición del parámetro. Por último hacemos una breve referencia a su utilización en la normativa más reciente como criterio de seguridad ante el fenómeno de choque térmico en la vasija.

## 1.- CODIGOS ASME Y 10CFR50

Dentro de las actividades que el grupo de mecánica de fractura de TECNATOM viene desarrollando desde hace varios años están las derivadas de los requisitos establecidos por los Apéndices G y H de 10CFR50 /1,2/ para las distintas centrales nucleares españolas.

El punto IV del Apéndice G mencionado, establece que los requisitos de tenacidad que deben observar los componentes de la barrera de presión del refrigerante del reactor han de ser los del Código ASME /3/ con algunas observaciones complementarias.

Todos los requisitos anteriores se podrían dividir en dos grupos: uno, requisitos de operación y dos, requisitos de tenacidad de los materiales.

Los requisitos que hemos denominado de operación son límites de presión y temperatura para los distintos transitorios de la planta que se deben establecer siguiendo las directrices del Apéndice G de ASME III/4/ y por tanto los criterios de la mecánica de fractura lineal-elástica.

De acuerdo con estos criterios, el crecimiento inestable de grieta se produce cuando las tensiones aplicadas suponen una  $K_I$  superior al  $K_{IC}$  del material, siendo  $K_{IC}$  una propiedad dependiente de la temperatura y significativa de la tenacidad a la fractura de dicho material.

La  $K_{IC}$  mencionada se refiere a condiciones estáticas de carga, además se debe considerar  $K_{Id}$  relativa a condiciones dinámicas de carga y un  $K_{Ia}$ , que caracteriza las condiciones en que una grieta deja de crecer.

Habría pues que disponer de las curvas características del material y analizar las condiciones de carga para comprobar que se está en la zona de seguridad.

Dada la dificultad de los ensayos de tenacidad necesarios para determinar estas curvas, se decidió acudir a unas nuevas curvas generales en función de la  $RT_{NDT}$  de fácil determinación mediante ensayos Charpy y Drop-weight. Así se dispone de la curva  $K_{IR}-T$ , representada en la Figura 1, que se ha obtenido como se indica en la Figura 2 de la envolvente inferior de todos los datos de  $K_{IC}$ ,  $K_{Id}$  y  $K_{Ia}$  disponibles, obtenidos del ensayo de diferentes probetas de SA-533 Grado B, Clase 1 y SA-508-1 y SA-508-2 /5/. De esta forma se consideran condiciones seguras de carga cuando la  $K_I$  calculada para un defecto postulado y un determinado estado de tensiones está situada debajo de la curva  $K_{IR}$ .

Dado que la curva  $K_{IR}-T$  se establece para cada material en función de su  $RT_{NDT}$  podemos decir que los que hemos llamado requisitos de operación del Apéndice G de 10CFR50 /1/ se establecen en función de las propiedades mecánicas del material, concretamente en función de la  $RT_{NDT}$  del mismo. Y así llegamos a los que hemos llamado requisitos de tenacidad de los materiales y que significan una limitación inferior al nivel superior de energía Charpy (upper shelf energy) en 50 ft.lbs (68 J) y tope máximo de 200° F (93° C) a la  $RT_{NDT}$  para el final de la vida útil de la vasija.

Estos requisitos conllevan ensayos mecánicos de construcción, estimaciones de fragilización por irradiación y programa de vigilancia de acuerdo con el Apéndice H de 10CFR50 /2/, actividades en las que participa el grupo de Mecánica de Fractura de TECNATOM.

De lo expuesto hasta ahora se desprende la importancia de la  $RT_{NDT}$ , que como se ha visto, está en la base de los requisitos de seguridad establecidos

por los principales códigos y normas del área que nos ocupamos, por lo que pasamos a describirla en los próximos capítulos.

## 2.- RT<sub>NDT</sub>

El punto II. D del Apéndice G de 10CFR50 /1/ para definir la temperatura de referencia remite al código ASME /3/ y en el punto NB-2330 de la Sección III de este código se define la RT<sub>NDT</sub> como la mayor de las temperaturas T<sub>NDT</sub> y (T<sub>CV</sub>-60F) siendo T<sub>NDT</sub> la temperatura de transición de ductilidad nula obtenida de ensayos dropweight y T<sub>CV</sub> la temperatura de ensayo Charpy en la cual se obtiene al menos 68 J. de energía absorbida y 0,89 mm. de expansión lateral.

Para la realización de ensayos dropweight se establece la norma ASTM E 208 /6/ donde se define la temperatura de transición de ductilidad nula (T<sub>NDT</sub>) como la máxima temperatura a la que rompe una probeta normalizada y ensayada de acuerdo con los procedimientos establecidos en dicha norma.

Para los ensayos Charpy se exige la observación de la norma ASTM E 23 /7/ y la determinación de la curva completa energía-temperatura y expansión lateral-temperatura a partir del ensayo de probetas con orientación transversal.

Dado que estos requisitos de los ensayos mecánicos precisos para determinar la RT<sub>NDT</sub> no eran de aplicación en los permisos de construcción anteriores al 15 de Agosto de 1973, muchas de las centrales antiguas no cuentan con datos de estos ensayos. Para asegurar que en estas centrales se tienen los mismos márgenes de seguridad que en las nuevas la "U.S. Nuclear Regulatory Commission" incluyó en el "Standard Review Plan 5.3.2." /8/ los métodos de determinación de la RT<sub>NDT</sub> que se deben aplicar cuando no se cuenta con resultados de ensayos dropweight o los ensayos Charpy realizados no cumplen los requisitos actuales.

Una vez establecida la RT<sub>NDT</sub> inicial, es preciso garantizar que se mantiene a lo largo de toda la vida útil de la planta dentro de los márgenes establecidos especialmente para los materiales de la vasija, ya que la fragilización por irradiación de estos materiales se manifiesta en un incremento de esta temperatura de referencia. En el próximo capítulo nos referimos a este desplazamiento de la temperatura de referencia  $\Delta RT_{NDT}$ .

## 3.- $\Delta RT_{NDT}$

La curva obtenida de los resultados de ensayos Charpy tiene la forma de la figura 3 y en ella se aprecian las tres zonas características. Una frágil de baja resiliencia (lower shelf), una de transición y una dúctil de alta resiliencia (upper shelf).

La operación del reactor produce una fragilización de los materiales, debido a la irradiación neutrónica. Esta fragilización se manifiesta de dos formas principalmente. Por un lado un incremento de la temperatura de transición y por otro un descenso del U.S.E. (upper shelf energy) como se indica en la figura 4. El incremento de la temperatura de transición supone un descenso de K<sub>IC</sub> a cada temperatura o lo que es igual, desplazamiento de la curva K<sub>IC</sub>-T (Figura 1) hacia la derecha.

Esta fragilización puede provocar al variar las propiedades mecánicas del material que éstas lleguen a no cumplir con lo requerido por la normativa vigente ya referenciada.

El incremento de la temperatura de transición se mide como desplazamiento horizontal de la curva Charpy a un nivel de energía o expansión lateral

convencionalmente establecido, así en la primera publicación del Apéndice G de 10CFR50 /1/ se establecía como incremento de la temperatura de referencia, el mayor de los experimentados a los niveles de 50 ft. lbs (68 J) y 35 mils (0,89 mm.) de expansión lateral, pero en su última revisión de Mayo de 1983 ya se establece como desplazamiento o incremento de la temperatura de referencia el medido al nivel de 30 ft.lbs (41 J) de energía absorbida, resolviéndose así una contradicción arrastrada durante diez años entre el criterio mantenido por el Apéndice G de 10CFR50 /1/ y el mantenido por la norma ASTM E 185 /9/ que ya al publicarse el mencionado Apéndice recomendaba el nivel de 30 ft.lbs (41 J) para medir el  $\Delta T_{NDT}$ .

De lo mencionado anteriormente se desprende que para garantizar la seguridad requerida hay, en primer lugar, que estimar esos desplazamientos previamente a que se produzcan y, posteriormente, realizar un seguimiento de los mismos para comprobar el comportamiento estimado.

Respecto a la estimación previa, se sabe que la magnitud de los cambios producidos por irradiación dependen fundamentalmente de la química del material y en este sentido ya en Julio de 1975 se publicó la "Regulatory Guide 1.99" /10/ que realiza una estimación en función de la fluencia recibida y el contenido en cobre y fósforo del material.

La ecuación de estimación se estableció en función de datos obtenidos experimentalmente y resulta muy conservativa en la casi totalidad de los casos. Posteriormente, a medida que los datos de programas de vigilancia y el conocimiento del mecanismo de fragilización han ido aumentando, han surgido nuevas ecuaciones modificando los elementos a considerar en la estimación. Así en la norma ASTM E900 /11/ publicada recientemente solo se considera el contenido de Cobre y otros investigadores como Guthrie y Odette han considerado cobre y níquel. Los trabajos de estos últimos /12/ y /13/ son los utilizados como base para una revisión 2 de la "Regulatory Guide" ya mencionada. Esta próxima revisión se ha hecho solo contando con datos de materiales irradiados en centrales comerciales dentro de sus programas de vigilancia y no, como se había hecho en las revisiones anteriores, con datos tanto de estas centrales como de reactores experimentales ya que se ha comprobado que el comportamiento es distinto en unos y otros reactores.

La existencia de gran número de ecuaciones propuestas para la estimación y un abundante banco de datos hace necesario y posible un estudio comparativo y evaluación de cada uno de estos procedimientos con objeto de aplicar los de resultados más ajustados.

Por otra parte, dado que estas ecuaciones de estimación se han obtenido por métodos estadísticos y que el conocimiento del mecanismo de fragilización aun no es completo, siguen siendo precisos los programas de vigilancia consistentes en irradiar de forma más rápida (más cerca del núcleo) probetas del mismo material y en las mismas condiciones de la vasija.

El Apéndice H de 10CFR50 /2/ establece los requisitos de estos programas de vigilancia y remite para su cumplimiento a la norma ASTM E 185 /9/. Esta norma hace necesario irradiar y posteriormente ensayar probetas de tracción y Charpy para obtener los datos de fragilización producida por irradiación. Se obtiene la  $\Delta T_{NDT}$  según se ha comentado anteriormente y se estudia su coherencia con los datos resultantes de los ensayos de tracción.

#### 4.- CHOQUE TERMICO

El choque térmico es el efecto de un enfriamiento importante de la vasija coincidiendo o seguido de una resurización de la misma.

En este caso el rápido enfriamiento de la superficie interior de la vasija produce tensiones térmicas que se añaden a las tensiones de presión si la vasija está presurizada.

Este fenómeno era conocido en la industria nuclear desde hace años pero fue el accidente de la Isla de las Tres Millas el que dió relevancia al tema y así en Marzo de 1981 la NRC (Nuclear Regulatory Commission) convocó una reunión de todas las partes implicadas (fabricantes y propietarios) para intercambiar información con vistas a desarrollar la normativa necesaria. Desde entonces ha habido continuas comunicaciones entre la industria y la NRC que culminaron tras múltiples revisiones y modificaciones en una reunión en Agosto de 1982 donde se adoptó el "Screening criteria" o criterio basado en valores umbrales de la  $RT_{NDT}$  de 270° F para soldaduras axiales y 300° F para las circunferenciales, de forma que centrales con  $RT_{NDT}$  inferiores a estos valores no requerirían medidas preventivas complementarias.

Este criterio se publicó en Noviembre de ese mismo año /14/ y en él se establecía también la forma en que debía calcularse la  $RT_{NDT}$  para que fuera comparable con los umbrales establecidos. En este sentido es significativo la mayor importancia y confianza dada a las curvas obtenidas para la estimación de  $\Delta RT_{NDT}$  a partir de los numerosos datos disponibles a nivel general en contraposición a los resultados obtenidos para un material dado en el programa de vigilancia específico de la planta.

El procedimiento que se establecía para la determinación de la  $RT_{NDT}$  en el documento ya referenciado /14/, fue propuesto para su publicación en el 10CFR50 y de esta forma el 29 de Febrero de 1984 se publicó la "Proposed Rule Making 50.61 con el título "Fracture Toughness Requirements for Protection Against Pressurized Thermal Shock Events" que recogía estos criterios con alguna modificación.

De estas modificaciones, las más significativas fueron por una parte que se estableció también para material base (forja y chapa) un valor umbral de 270° F al igual que para soldaduras axiales. Y por otra parte el procedimiento para determinar la  $RT_{NDT}$  quedaba definiendola como el menor valor de los resultados de las ecuaciones:

$$RT_{NDT} = I + M + ( -10 + 470 Cu + 350 NiCu ) f^{0,270}$$

$$RT_{NDT} = I + M + 283 f^{0,194}$$

donde:

I Es la temperatura de referencia inicial calculada como se establece en el párrafo NB-2331 del código ASME /3/. Si no se tienen valores válidos entonces se usará 0° F para soldaduras hechas con Linde 80 y -56° F para con Linde 0091, 1092 y 124 y con ARCOS B-5.

M Es 48° F en la primera ecuación si I es un valor medido y 59° F si son los valores medios establecidos genéricamente. En la segunda ecuación M = 0° F si se ha usado el valor medio de I y M = 34° F si se usan valores genéricos.

Cu y Ni son los tantos por ciento en peso de cobre y níquel.

f es la fluencia en unidades de  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( E ≥ 1 Mev )

Estos son los criterios actualmente utilizados, todavía pendientes de su aprobación y publicación definitiva en el 10CFR50.

## REFERENCIAS

- /1/ Appendix G "Fracture Toughness Requirements" 10 CFR Part 50 Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities. May 31, 1983.
- /2/ Appendix H "Reactor Vessel Material Surveillance Program Requirements" 10CFR Part 50 Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities. May 31, 1983.
- /3/ Boiler and Pressure Vessel Code, Section III and Section XI, American Society of Mechanical Engineers, U.S.A. 1980
- /4/ Appendix G "Protection Against Nonductile Failure" Section III, Division 1. Appendices. ASME.
- /5/ PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials.. WRC Bulletin No 175 August 1972.
- /6/ ASTM E208-81 "Standard Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels.
- /7/ ASTM E 23-82 "Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials".
- /8/ NUREG-0800 "Standard Review Plan 5.3.2 Pressure-Temperature Limits". U.S. Nuclear Regulatory Commission. Rev. 1-July 1981.
- /9/ ASTM E 185-82 "Standard Practice for Conducting Surveillance Tests for Light-water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels".
- /10/ Regulatory Guide 1.99 "Effects of Residual Elements on Predicted Radiation Damage to Reactor Vessel Materials" U.S. Nuclear Regulatory Commission. July 1975.
- /11/ ASTM E900-83 "Standard Guide for Predicting Neutron Radiation Damage to Reactor Vessel Materials".
- /12/ Guthrie G.L., "Charpy Trend Curves Based on 177 PWR Data Points LWR PV SDIP. Quarterly Progress Report April 1983-June 1983 NUREG/CR-3391 vol.2 HEDL-TME 83.22.
- /13/ Odette G.R. and Lombrozo P.M., "Physically Based Regression Correlations of Embrittlement Data from REactor Vessel Surveillance Programs" EPRI NP-3319, Final Report, January 1984
- /14/ NRC Policy Issue on Pressurized Thermal Shock, SECY-82-465 November 23, 1982

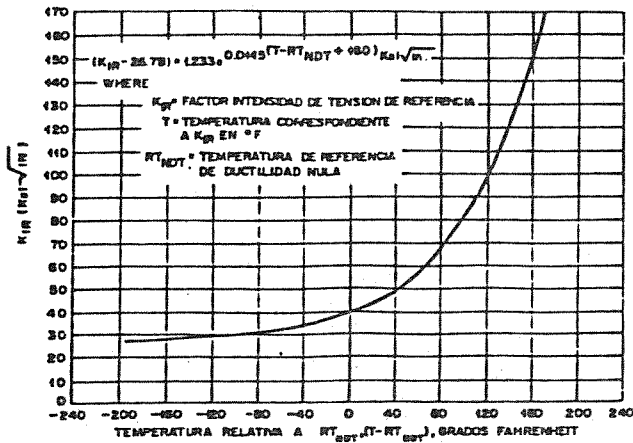


Fig. 1. Figura G-2210-1 de Apéndice G de ASME III.

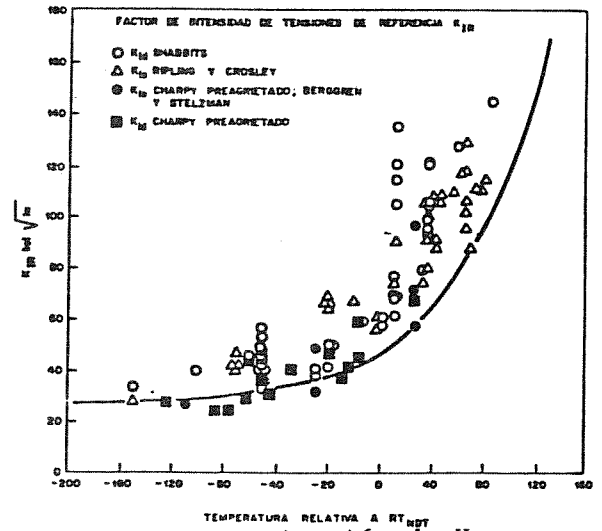


Fig. 2 Determinación de  $K_{IR}$  a partir de datos experimentales.

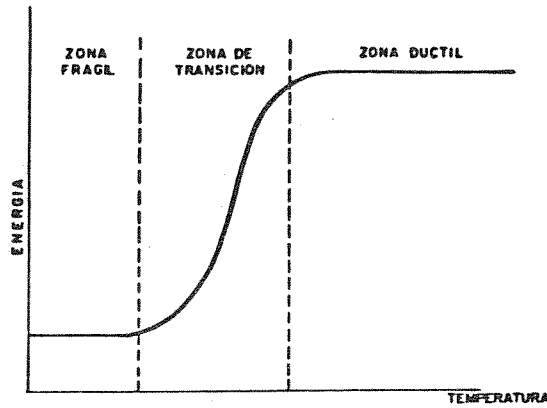


Fig. 3 Ejemplo de curva Charpy

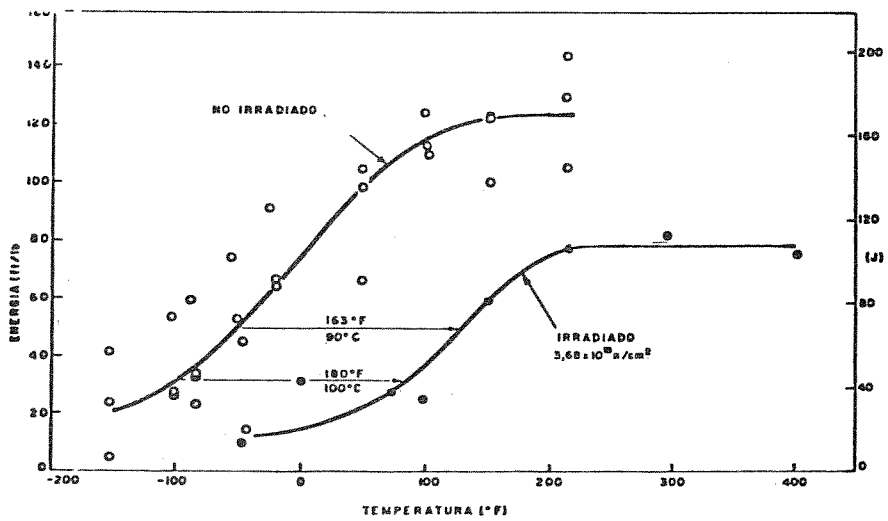


Fig. 4 Efecto de la irradiación sobre la curva Charpy.