

DETERMINACION DE LA “MASTER CURVE” DE UN ACERO DE VASIJAS NO-IRRADIADO E IRRADIADO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROBETAS PEQUEÑAS

M. Serrano, F.J. Perosanz, J. Lapeña

Materiales Estructurales de Plantas Energéticas.
Departamento de Fisión Nuclear
CIEMAT. Avda. Complutense 22, 28040 Madrid

Resumen. Una de las características mecánicas de las vasijas de presión que más se ven afectadas por la irradiación neutrónica es la de la tenacidad de fractura. Su importancia es relevante puesto que se utiliza para determinar la integridad estructural de la vasija ante diversos transitorios, como PTS, curvas de calentamiento y enfriamiento, etc., de forma que se evite en todo momento la fractura frágil de la vasija. El valor de la tenacidad de fractura va aumentando con la temperatura desde comportamiento frágil a dúctil según una curva característica indexada a una temperatura de referencia RT_{NDT} . La irradiación produce el desplazamiento de dicha curva hacia temperaturas más altas o, lo que es lo mismo, un desplazamiento de RT_{NDT} . Dado que la tenacidad de fractura, con la normativa tradicional, no es posible medirla con probetas de pequeño tamaño, habitualmente se determina dicha propiedad en el material irradiado de modo indirecto a través del ensayo de las probetas Charpy-V existentes en las cápsulas de vigilancia, y suponiendo igual el desplazamiento de la curva de tenacidad de fractura al de energía Charpy al nivel de 41 Julios. Los modernos avances en la mecánica de fractura y el actual concepto de la “Master Curve” posibilitan trazar una curva probabilística de tenacidad de fractura, a partir de probetas tipo Charpy-V, que depende únicamente de una temperatura de referencia T_0 . Esta tiene un significado físico más adecuado que la tradicional RT_{NDT} . En la ponencia se presentan la determinación de la “Master Curve” de aceros de vasija mediante probetas de flexión en tres puntos tipo Charpy-V (PCCV) para material no irradiado, e irradiado en una central nuclear comercial.

Abstract. One of the characteristics of pressure vessels more affected by neutron irradiation is the fracture toughness. This property is used to determine its structural integrity in some transients, as PTS, cooling and heating, etc., in order to avoid brittle fracture of the pressure vessel. Fracture toughness is increasing with temperature from brittle to ductile fracture, following a characteristic curve indexed to a reference temperature RT_{NDT} . Fracture toughness is not possible to be measured, following traditional standards, with small specimens. Then it is usually determined in irradiated state, by an indirect way, testing the Charpy-V specimens from surveillance capsules, supposing fracture toughness curve shift equal to Charpy-V curve shift at 41 Joules level. Modern advances in fracture mechanics and Master Curve approach permit, through tests of Charpy-V specimens, to obtain a probabilistic fracture toughness curve. This curve is indexed to a reference temperature, T_0 that has a more adequate physical meaning compared with RT_{NDT} . In this paper, “Master Curve” is determined of non-irradiated and irradiated reactor pressure vessel steels by three point bend specimens of Charpy-V type.

1. INTRODUCCIÓN

Para evaluar la integridad estructural de la vasija del reactor de una Central Nuclear, cuya misión es la de contención del núcleo, es necesario ajustar las curvas de presión-temperatura de operación y transitorios para evitar una fractura frágil. Estas curvas dependen de la tenacidad de fractura del material de la vasija que a su vez se ve afectada por la irradiación neutrónica. Al principio de los años 70, el Pressure Vessel Research

Committee (PVRC) formó un grupo para estudiar la fractura de la vasija a presión del reactor y recomendar métodos de análisis para asegurar la integridad estructural de la misma. Esos métodos que actualmente se encuentran recogidos en Ley Federal 10CFR50 y el Código ASME, se basan en la determinación de la tenacidad de fractura a través de correlaciones con los ensayos Charpy realizados con las probetas incluidas en las cápsulas de vigilancia. En concreto, se indexa la tenacidad de fractura con una temperatura de referencia

RT_{NDT} y se supone que la variación de esta temperatura de referencia con la irradiación es la misma que la temperatura para la cual la energía Charpy es de 41 J. Los modernos avances en la mecánica de fractura y el actual concepto de la “Master Curve” posibilitan trazar una curva probabilística de tenacidad de fractura, a partir del ensayo de tenacidad de fractura de probetas tipo Charpy-V, que depende únicamente de una temperatura de referencia T_0 . Esta tiene un significado físico más adecuado que la tradicional RT_{NDT} .

En esta ponencia se presentan los resultados finales del proyecto de “Aseguramiento de la integridad estructural de la vasija de presión de los reactores”, llevado a cabo por el CIEMAT en colaboración con CSN y UNESA, en el marco del PCI que hace uso del concepto de la “Master Curve” en materiales irradiados y no irradiados. Este proyecto representa la contribución española al análogo a escala internacional promovido por el OIEA CRP IV.

También se incluye la aplicación del nuevo ASME Code Case N629, basado en el concepto de la “Master Curve”.

2. CONCEPTO DE LA “MASTER CURVE”

El concepto de la “Master Curve”, desarrollado por el Prof. Wallin del VTT, está basado en que la iniciación de fractura por clivaje de los aceros ferríticos en la zona de transición frágil-dúctil es inherentemente un proceso estadístico [1]. Se ha demostrado que la fractura por clivaje puede ser modelizada utilizando una distribución de Weibull de tres parámetros [2].

$$P = 1 - \exp[-((K_{JC} - K_{min}) / (K_0 - K_{min}))^b] \quad (1)$$

Esta técnica se ha utilizado para determinar la mediana de resultados experimentales a varias temperaturas, observándose que para una variedad de aceros ferríticos, la curva presenta una forma característica. Este resultado sugiere que la tenacidad de fractura para estos materiales puede describirse por una serie de curvas que se diferencian únicamente por su posición respecto al eje de temperaturas. Este es el origen del término “Master Curve” [2].

Para aceros ferríticos la “Master Curve” tiene la forma:

$$K_{JC(med)} = 30 + 70 \exp(0.019(T - T_0)) \quad (2)$$

El profesor Wallin, después de realizar análisis de Weibull de numerosos resultados de tenacidad de fractura, concluye que para probetas de espesor 1T, igual al espesor de referencia, la pendiente de Weibull b es igual a 4 y que el valor mínimo de tenacidad de fractura K_{min} , es igual a 20 MPa \sqrt{m} .

La universalidad de la “Master Curve” ha sido demostrada en varias publicaciones internacionales,

entre las más importantes la publicada por el ORNL que sirve como base del nuevo Code Case N 629 [3]. En el CIEMAT, mediante el análisis de la base de datos propia de tenacidad de fractura también se ha intentado demostrar esta universalidad, como puede verse en la Figura 1.

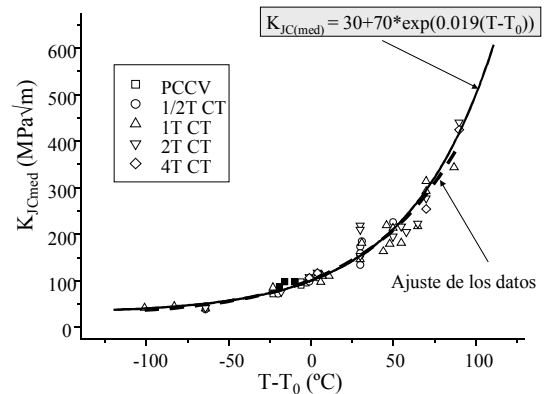


Figura 1: Universalidad de la “Master Curve” para aceros de vasija irradiados y no irradiados

Aplicando el concepto de la “Master Curve”, la curva de tenacidad de fractura se determina mediante un único parámetro, que establece la posición de la curva en la escala de temperatura. Este parámetro se denomina T_0 y se define como la temperatura para la cual la mediana de la tenacidad de fractura para una probeta de espesor 1T (1 pulgada) es igual a 100 MPa \sqrt{m} . El valor de T_0 se determina a partir de la mediana de los resultados de tenacidad de fractura a través de la ecuación (2).

Para solventar el efecto del espesor en la tenacidad de fractura basta con igualar la probabilidad de fallo para dos probetas, una de espesor B_x y otra con el espesor de referencia (1”), con lo que la corrección de tamaño viene dada por:

$$K_{JC(1T)} = K_{min} + (K_{JC(x)} - K_{min})(B_x / 25.4)^{1/4} \quad (3)$$

Como ya se ha mencionado anteriormente, se pueden establecer unas bandas de confianza para la Master Curve. Así mismo la incertidumbre asociada a la determinación de T_0 se puede estimar a partir del número de probetas ensayadas. Cuando se añade al T_0 su incertidumbre se habla de T_0 ajustado.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) ha editado recientemente la norma ASTM E 1921-97 para la determinación de T_0 en la zona de transición frágil-dúctil de aceros ferríticos mediante la aplicación de la “Master Curve” [4], actualmente en proceso de revisión.

3. MATERIALES Y PROBETAS

El programa experimental se ha realizado con los siguientes materiales:

- Material de referencia del OIEA denominado JRQ correspondiente a la especificación ASTM A533 B1. El bloque enviado al CIEMAT tenía la designación 5JRQ35 de dimensiones 150x185x225 mm
- Material de referencia del OIEA JRQ irradiado a una fluencia de $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm². Esta irradiación se realizó durante la anterior fase del proyecto, es decir durante el CRP III, en la C.N. de ASCO II.
- Material de vasija español denominado MVE correspondiente a la especificación ASTM A533 B1.

La composición química y propiedades mecánicas se muestran en las Tablas 1 y 2

Se han mecanizado las siguientes probetas, con una orientación T-L (definida en la norma ASTM E 399):

- CVN: Probetas Charpy-V para ensayo de impacto Charpy
- PCCV: Probetas tipo Charpy-V preagrietadas para ensayos de tenacidad de fractura en flexión en tres puntos.
- 1/2T CT: Probetas CT de 1/2" de espesor para ensayos de tenacidad de fractura

Tabla 1: Composición química (% en peso)

	MVE	JRQ
C	0.177	0.180
Si	0.228	0.250
Mn	1.420	1.410
P	0.005	0.018
S	0.002	0.004
Cu	0.041	0.14
Ni	0.632	0.84
Cr	0.118	0.120
Mo	0.503	0.500
V	<0.005	0.003
Al	0.024	0.014

Tabla 2: Propiedades mecánicas a temperatura ambiente

	MVE	JRQ	
Fluencia (n/cm ²)	0	0	$0.364 \cdot 10^{19}$
Límite elástico (MPa)	456	484	563
Resistencia (MPa)	600	625	709
Elongación (%)	30	24.7	23.7
RT _{NDT} (°C)	-35	-15	--

4. ENSAYOS DE IMPACTO CHARPY

La determinación de la temperatura de referencia T_0 recogida en la norma ASTM E1921 se basa en determinar los parámetros de Weibull de al menos seis ensayos de tenacidad de fractura realizados a una misma temperatura. La temperatura de los ensayos de tenacidad

de fractura debe ser cercana al valor de T_0 del material y viene determinada por la expresión:

$$T_{\text{ensayo}} = T_{28J} + C \quad (4)$$

Donde T_{28J} es la energía correspondiente a una energía de impacto Charpy de 28 Julios y C es una constante que depende del tamaño de la probeta. En el caso de probetas tipo Charpy-V preagrietadas el valor de C es igual a -50 °C.

En la Tabla 3 se muestran los valores de T_{28J} y la correspondiente temperaturas de los ensayos de tenacidad de fractura para los materiales en estudio.

Tabla 3: Valores de T_{28J} y correspondiente temperatura de los ensayos de tenacidad de fractura.

Material	T_{28J} (°C)	T^a Ensayos (°C)
JRQ No irradiado	-23	-73
JRQ Irradiado	27	-30
MVE No irradiado	-71	-121

La Figura 2 muestra el desplazamiento debido a la irradiación neutrónica de la curva Charpy del material JRQ.

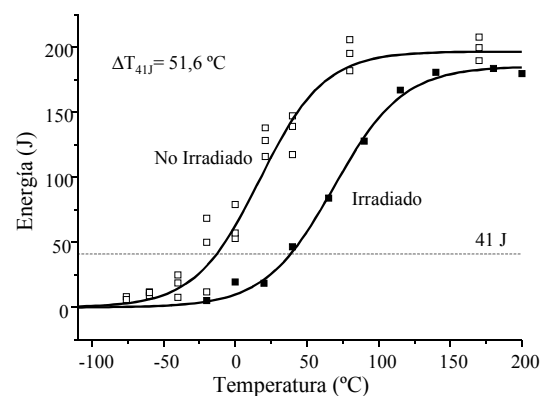


Figura 2: Efecto de la irradiación neutrónica en la energía Charpy de acero JRQ

5. ENSAYOS DE TENACIDAD DE FRACTURA. DETERMINACIÓN DE LA "MASTER CURVE"

2.1 Acero JRQ sin irradiar

Se han realizado ocho (8) ensayos de tenacidad de fractura con probetas PCCV a -73 °C del material JRQ sin irradiar para determinar el valor de T_0 cuyo valor para este material en este estado es de -71 °C.

Para la validación de la Master Curve se han realizado los siguientes ensayos:

- PCCV (16 probetas) ensayadas desde -50 °C hasta +60 °C
- 1/2T CT (17 probetas) ensayadas desde -73 °C hasta +60 °C

Los resultados de todos los ensayos de tenacidad de fractura realizados con probetas PCCV y 1/2T CT del material JRQ sin irradiar se muestran en la Figura 3 junto con la “Master Curve” determinada mediante el ensayo de 8 probetas PCCV a una temperatura de -73°C ($T_0 = -71^{\circ}\text{C}$). En esta figura también se presentan los resultados de tenacidad de fractura con probetas 1T CT pertenecientes a la Base de Datos del OIEA [5]. Como se observa, las bandas de confianza describen la dispersión de los resultados experimentales. Así mismo, la banda de confianza del 1%, tomando el valor de T_0 ajustado, engloba a todos los resultados experimentales en la zona de transición.

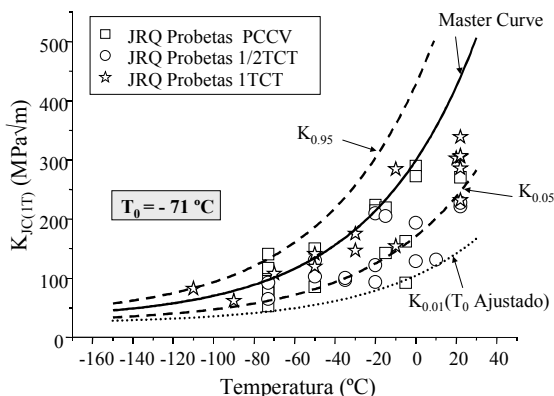


Figura 3: Determinación y validación de la “Master Curve” para el acero JRQ sin irradiar.

2.1 Acero JRQ irradiado

Se han ensayado 6 probetas tipo PCCV de material JRQ Irradiado (fluencia= $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm²) a una temperatura de -30°C en las semiceldas de plomo del CIEMAT. El valor de T_0 calculado para el material JRQ irradiado es de -19°C .

Si comparamos los valores de la temperatura de referencia del material JRQ sin irradiar e irradiado a una fluencia de $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm² ($E > 1\text{MeV}$), vemos que el valor de T_0 ha sufrido un aumento de 52°C , similar al incremento de la T41J del ensayo de impacto Charpy (ver Figura 4)

2.1 Acero MVE sin irradiar

Se han realizado ocho (8) ensayos de tenacidad de fractura en flexión en tres puntos con probetas PCCV a -121°C . El valor de la temperatura de referencia T_0 para este material en este estado es de -119°C .

Para la validación de la Master Curve del material MVE se han realizado los siguientes ensayos:

- PCCV (16 probetas) ensayadas desde -90°C hasta $+40^{\circ}\text{C}$
- 1/2T CT (15 probetas) ensayadas desde -90°C hasta $+40^{\circ}\text{C}$

Los resultados de todos los ensayos de tenacidad de fractura realizados con probetas PCCV y 1/2T CT del

material MVE se muestran en la Figura 5, junto con la “Master Curve” determinada mediante el ensayo de 8 probetas PCCV a una temperatura de -121°C ($T_0 = -119^{\circ}\text{C}$). En esta figura también se presentan los resultados de tenacidad de fractura con probetas 1T CT pertenecientes al CIEMAT. Como en el caso del material JRQ la banda de confianza del 1%, tomando el valor de T_0 ajustado, engloba a todos los resultados experimentales en la zona de transición

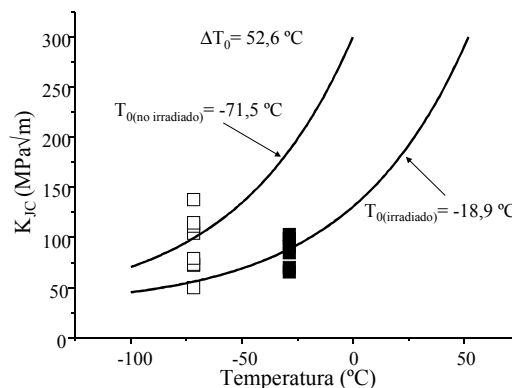


Figura 4: Efecto de la irradiación en la “Master Curve” para el acero JRQ.

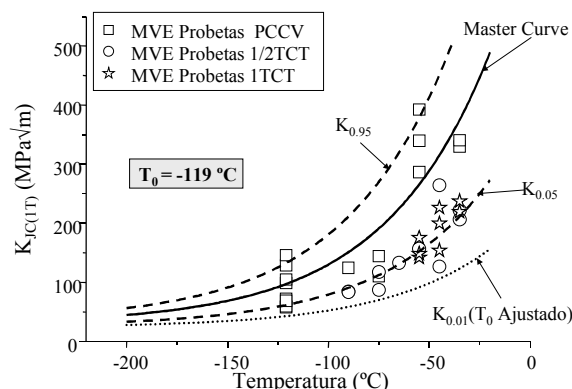


Figura 5: Determinación y validación de la “Master Curve” para el acero MVE sin irradiar.

5. FRACTOGRAFIA

Es bien conocido que la presencia de impurezas en el borde de grano de materiales ferríticos, induce a fractura intergranular. Como los resultados del análisis AUGER [6] mostraban la presencia de P, Ni y Cu en los bordes de grano del material JRQ, se examinaron las superficies de fractura de las probetas PCCV del material JRQ utilizadas para la determinación de T_0 mediante SEM. Los resultados de este análisis muestran la presencia de una zona intergranular cerca de la pregrieta de fatiga en todas las probetas (ver Figura 6). La fracción de área intergranular (IGF) para todas ellas es menor que el 0,05% (menos de 8 granos), de la superficie total de clivaje.

Ante estos resultados se han realizado análisis de otras probetas de tenacidad de fractura del material JRQ. Así

en probetas PCCV ensayadas a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y probetas 1/2T CT ensayadas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se han encontrado modos de fractura similares, es decir con una pequeña fracción de fractura intergranular sin una correlación clara entre la IGF y el valor de la tenacidad de fractura. En estos casos el área de fractura intergranular es menor que el 2% de la superficie total de clivaje.

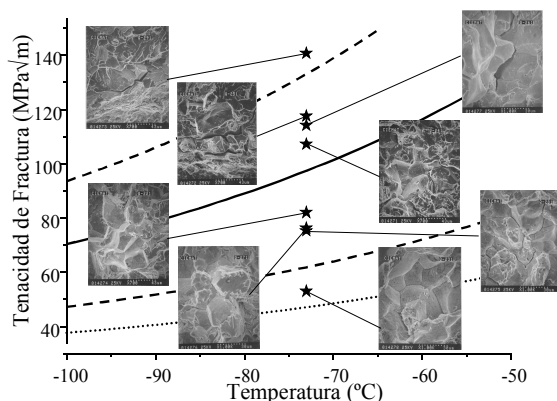


Figura 6: Superficies de fractura probetas de tenacidad de fractura del acero JRQ.

5. APLICACION DE LOS RESULTADOS A LA EVALUACION DE CAPSULAS DE VIGILANCIA

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, el concepto de la “Master Curve” es una técnica muy útil para determinar los cambios en la tenacidad de fractura de materiales de vasija debido a irradiación neutrónica.

Un grupo de trabajo incluido en el PVRC (Pressure Vessel Research Council) está evaluando la potencial aplicación de la “Master Curve” como alternativa a la metodología de ASME para evaluar la integridad estructural de la vasija [7,8]. Como objetivo a corto plazo se ha desarrollado un método alternativo utilizando T_0 como parámetro de indexación de la curva de tenacidad de fractura en vez de RT_{NDT} , incluido en un nuevo Code Case de ASME [9]. Este nuevo parámetro se denomina RT_{T0} y está definido como:

$$RT_{T0} = T_0 + 35\text{ }^{\circ}\text{F} \quad (5)$$

Esto significa que la curva de tenacidad de fractura de referencia de ASME tendría la forma:

$$K_{IC} = 36.5 + 3.083 \cdot \exp(0.036(T - RT_{T0} + 55.6)) \quad (6)$$

Para comparar esta nueva metodología, basada en la “Master Curve” y la actual metodología de la Ley Federal 10FR50.61, basada en RT_{NDT} , se han considerado los valores de RT_{NDT} y RT_{T0} para el material JRQ en estado de recepción, e irradiado como si fuera una cápsula de vigilancia.

PROCEDIMIENTO ACTUAL: La temperatura de referencia ajustada para el material irradiado se determina mediante:

$$ART_{NDT} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} + M_{NDT} \quad (7)$$

Donde:

$RT_{NDT(U)}$ es la temperatura de referencia de ductilidad nula para el material no irradiado. Para el material JRQ $RT_{NDT(U)}$ es de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($5\text{ }^{\circ}\text{F}$)

ΔRT_{NDT} es el aumento de la temperatura de referencia de ductilidad nula debido a la irradiación estimada según la Guía Reguladora 1.99 Rev 2 como:

$$\Delta RT_{NDT} (\text{estimado}) = CF \cdot f^{(0.28-0.10 \log f)} \quad (8)$$

Donde CF es un factor que depende del contenido en cobre y níquel del material, tabulado en la R.G. 1.99 Rev. 2. El material JRQ tiene 0,14% de Cu y 0,84% de níquel, por lo que $CF = 105,2\text{ }^{\circ}\text{F}$

f es la fluencia neutrónica recibida, que en este caso es de $0,364 \cdot 10^{19}\text{ n/cm}^2$ ($E > 1\text{ MeV}$). Por lo tanto ΔRT_{NDT} estimado es de $75,8\text{ }^{\circ}\text{F}$

Si existen cápsulas de vigilancia el valor de ΔRT_{NDT} medido es igual al ΔT_{41J} del ensayo Charpy. Para el acero JRQ el ΔRT_{NDT} medido es de $92,9\text{ }^{\circ}\text{F}$

M_{NDT} es un margen que es necesario añadir debido a las incertidumbres asociadas a los valores de $RT_{NDT(U)}$, contenido en cobre y níquel, fluencia y procedimiento de cálculo. M_{NDT} se evalúa como:

$$M_{NDT} = 2 \cdot \text{Raiz}(\sigma_I^2 + \sigma_{\Delta}^2) \quad (9)$$

Donde σ_I es la desviación estándar de $RT_{NDT(U)}$. Si este valor se determina experimentalmente $\sigma_I = 0$ en caso contrario $\sigma_I = 17\text{ }^{\circ}\text{F}$. Para el material JRQ σ_I es $0\text{ }^{\circ}\text{F}$.

σ_{Δ} es la desviación estándar de ΔRT_{NDT} que es igual a $28\text{ }^{\circ}\text{F}$ para soldaduras y $17\text{ }^{\circ}\text{F}$ para material base

Para el material JRQ σ_{Δ} es $17\text{ }^{\circ}\text{F}$

Por lo tanto $M_{NDT} = 34\text{ }^{\circ}\text{F}$

Este procedimiento para el material JRQ irradiado a una fluencia de $0.364 \cdot 10^{19}\text{ n/cm}^2$ suministra un valor de ART_{NDT} de $131,9\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$), tomando el $\Delta RT_{NDT}(\text{medido})$

ASME CODE CASE N-629: La temperatura de referencia ajustada para el material irradiado se determina mediante:

$$ART_{T0} = RT_{T0} + M_{T0} \quad (10)$$

RT_{T0} viene dado por la ecuación (5) donde el valor de T_0 se determina ensayado probetas de material irradiado y M_{T0} es dos veces la desviación estándar de la temperatura de referencia T_0 que viene dada en la norma ASTM E1921 en función del número de probetas ensayadas.

Este procedimiento para el material JRQ irradiado a una fluencia de $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm² suministra un valor de RT_{T0} de **59,4 °F (15 °C)**

COMPARACIÓN: La Figura 6 muestra las curvas de referencia de tenacidad de fractura indexadas con RT_{NDT} y RT_{T0} para el material JRQ sin irradiar e irradiado. Como puede verse en esta figura, la curva ASME indexada con RT_{T0} es menos conservativa que la curva ASME indexada con RT_{NDT} , incrementando en 40°C la ventana de operación de la vasija.

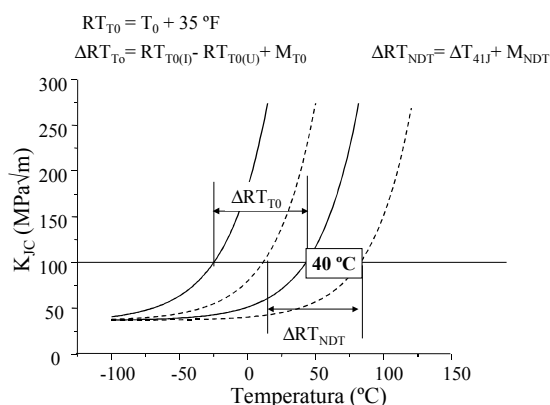


Figura 6: Aplicación de la “Master Curve”. Nueva temperatura de referencia (RT_{T0}) para la curva ASME de tenacidad de fractura estática

6. CONCLUSIONES

- La “Master Curve” parece ser válida para caracterizar la variación de la tenacidad de fractura con la temperatura en la zona de transición
- Pequeñas áreas de fractura intergranular parecen no influir en la validez de la metodología de la “Master Curve”. Se sugiere que sería recomendable realizar análisis sistemáticos de las superficies de fractura de las probetas de tenacidad de fractura para confirmar este hecho.
- El aumento de T_0 debido a la irradiación neutrónica es similar al aumento de la temperatura T_{4IJ} del ensayo Charpy. Para el material JRQ irradiado a una fluencia de $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm² ($E > 1\text{MeV}$) en un reactor comercial $\Delta T_0 = 1.01 \Delta T_{4IJ}$ relación similar a la encontrada por otros autores [10].
- La curva de referencia de tenacidad de fractura del Código ASME, indexada con la nueva temperatura de referencia RT_{T0} , suministra un aumento de 40°C en el margen de operación, comparada con la curva ASME indexada con RT_{NDT} para el material JRQ irradiado a $0.364 \cdot 10^{19}$ n/cm² ($E > 1\text{MeV}$) en un reactor comercial.

7. REFERENCIAS

1. Anderson, T.L. “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications”. CRC Press 1995
2. Wallin, K. “The Scatter in KIC Results”. Engineering Fracture Mechanics 19(6), 1984

3. McCabe, D.E.; Merkle, J.G.; Wallin, K. “Technical Basis for the Master Curve Concept of Fracture Toughness Evaluations in the Transition Range” 30th National Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, St. Louis, MO, June 23-25, 1998
4. ASTM E 1921-97: “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range”
5. Guillemot F. “Final Database Report on IAEA CRP on Optimizing of Reactor Pressure Vessel Surveillance Programs and Their Analyses. Vol 2”. IWG-LMNPP-94/7. 1994
6. Lapeña J., Serrano M., Perosanz F.J., Gómez-Briceño M. D. “Programa de Investigación Coordinado Sobre el Aseguramiento de la Integridad Estructural de la Vasija a Presión de los Reactores BWR y PWR. Informe Final”. DFN/ME-08/00
7. Rosinski S.T. “Application of the Master Curve in the ASME Code”. IAEA Specialists Meeting on Irradiation Embrittlement and Mitigation 26-29 April 1999, Madrid, SPAIN
8. Server W. “Application of the Master Curve Fracture Toughness Methodology for Ferritic Steels”. EPRI TR-108390. Final Report April 1998.
9. ASME Code Case N-629, Use of Fracture Toughness Test Data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials for Section XI, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1999.
10. Sokolov M.A., Nanstad R.K. “Comparison of Irradiation-Induced shifts of KJC and Charpy Impact Toughness for Reactor Pressure Vessel Steels”. Effect of radiation on materials: 18th International Symposium ASTM STP 1325, 1999.