

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA TENACIDAD DE FRACTURA ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN ACERO ASTM A 533 B

J. Lapeña, F. J. Perosanz, M Serrano

CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
Avda. Complutense 22, Madrid 28040 (ESPAÑA)

Resumen: Las curvas Presión-Temperatura de la vasija del reactor de las centrales nucleares, especialmente en los calentamientos y enfriamientos, están calculadas de forma que se asegure la integridad estructural de la misma. Estas curvas delimitan las zonas de operación segura atendiendo a criterios de mecánica de fractura. Sin embargo, estas curvas se obtienen de forma indirecta mediante ensayos Charpy-V, con lo que los resultados han de ser necesariamente conservadores. En el presente trabajo, comparamos el comportamiento de un material característico de vasijas de presión de reactores nucleares (ASTM A 533 B) por medio de dos técnicas: Charpy-V usando péndulo instrumentado y ensayos de tenacidad de fractura con probetas CT de 1 y 1/2 " siguiendo la norma de ensayo ASTM E 813. Se ha desarrollado un criterio propio para la determinación de crecimiento de grieta en ensayos dinámicos de péndulo instrumentado, verificando posteriormente la concordancia con los datos quasi-estáticos de tenacidad de fractura.

Abstract: The Pressure-Temperature curves of the reactor vessels in nuclear power stations, are calculated in a form which insures structural integrity, especially during heat up and cool down. These curves delimit the zones of safe operation, according to fracture mechanics criteria. However, these curves are obtained in an indirect way, through Charpy - V tests, because of this, the results have to be necessarily conservative. In the present work, we compare the behavior of a RPV characteristic material (ASTM A 533 class B) using two techniques: instrumented Charpy impact test and standard fracture toughness test with CT specimens of 1 and 1/2 " using ASTM E 813 standard. A criteria has been developed for the estimation of crack initiation in dynamic instrumented impact tests, verifying the conformity with the quasi-static fracture toughness data.

INTRODUCCION

Los límites de funcionamiento en operación normal en una planta nuclear vienen señalados por las llamadas curvas de operación (Figura 1). Estas, delimitan zonas de presión y temperatura dentro de las cuales el comportamiento del material de la vasija se califica de seguro ante cualquier eventualidad. Las curvas por consiguiente, son representativas del estado mecánico de la vasija y evolucionan con el tiempo, debido fundamentalmente al daño producido por la irradiación neutrónica. Esta evolución se sigue mediante la extracción y análisis de cápsulas de vigilancia, colocadas estratégicamente en diferentes posiciones en el interior del núcleo con el objeto de conocer con la suficiente antelación el estado de la vasija después de un período (estimado según el flujo neutrónico) de funcionamiento.

Los procedimientos de vigilancia varían según la licencia de construcción de la central, aunque en la práctica más habitual se introducen probetas de tracción, Charpy-V y CT de 1/2 ". Estas últimas no vienen siendo

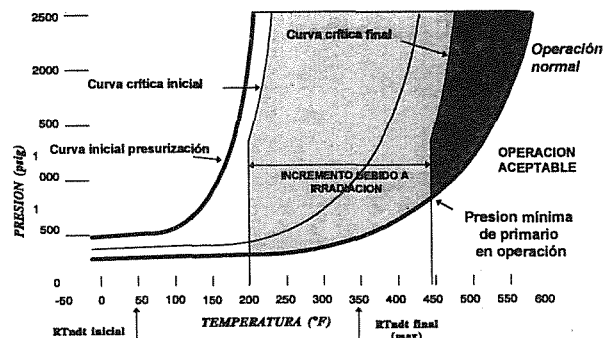


Figura 1. Curvas de operación

ensayadas normalmente dentro de los procedimientos de vigilancia, debido a discrepancias en el criterio de interpretación de resultados, pues, motivado por el pequeño espesor de estas probetas, los datos obtenidos

siguiendo la normativa de ensayo ASTM no entran dentro del rango de validez exigido por la norma.

El compromiso necesario entre seguridad y coste económico (transitorios de corta duración) se decanta obviamente hacia el lado de la seguridad, por lo que la estimación de datos de tenacidad de fractura a partir de ensayos Charpy-V es necesariamente conservadora. En este sentido, la posibilidad de reducir el conservadurismo asegurando por supuesto la integridad de la vasija en condiciones de transitorios, daría lugar a tiempos reducidos de arranque o parada con el consiguiente ahorro económico.

La incertidumbre entre las evaluaciones de tenacidad estáticas y dinámicas condicionan fuertemente los márgenes de seguridad aceptados. En el momento actual, no existe un criterio claro para la comparación y estimación de parámetros como la tenacidad de fractura en ensayos cuasiestáticos (ASTM E 813) y ensayos dinámicos [1] (Charpy), en este trabajo, se ha pretendido establecer un rango de comparación entre ambos, usando una herramienta más poderosa como es el Charpy instrumentado, el cual, proporciona un registro continuo Fuerza-Tiempo del que se pueden extraer consecuencias adicionales.

PARTE EXPERIMENTAL

Material

En todos los ensayos llevados a cabo se ha utilizado un acero típico de vasijas de presión para Centrales Nucleares ASTM A 533 B. La composición química porcentual de sus elementos más importantes y las propiedades mecánicas vienen referidas en las Tabla I y II.

Tabla I : Composición química

(%) C	0.180
(%) Mn	1.420
(%) Si	0.240
(%) P	0.017
(%) S	0.004
(%) Cr	0.120
(%) Ni	0.840
(%) Mo	0.510
(%) V	0.002
(%) Cu	0.140

Tabla II : Propiedades mecánicas

Límite elástico (MPa)	484
Resistencia a tracción (MPa)	622
Alargamiento en rotura (%)	26
Estricción (%)	77

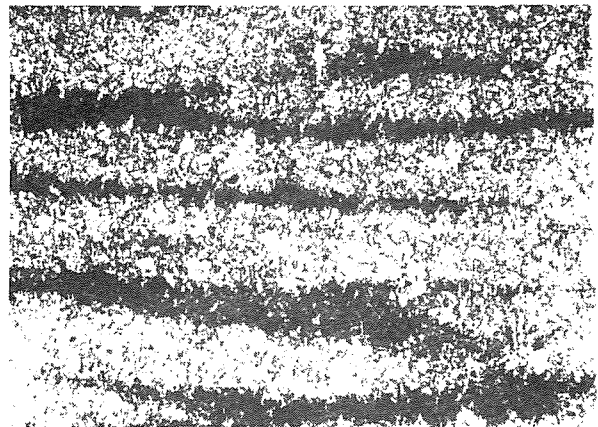


Figura 2. Microestructura del acero x 50

De las figuras (micrográficas de SEM) 2 y 3, es posible observar una segregación en bandas, en las cuales existe una clara diferencia en cuanto a la densidad de carburos; las bandas oscuras presentan una precipitación de carburos homogénea y mas abundante, mientras que las bandas mas claras presentan zonas ricas en carburos con otras prácticamente desprovistas de ellos.

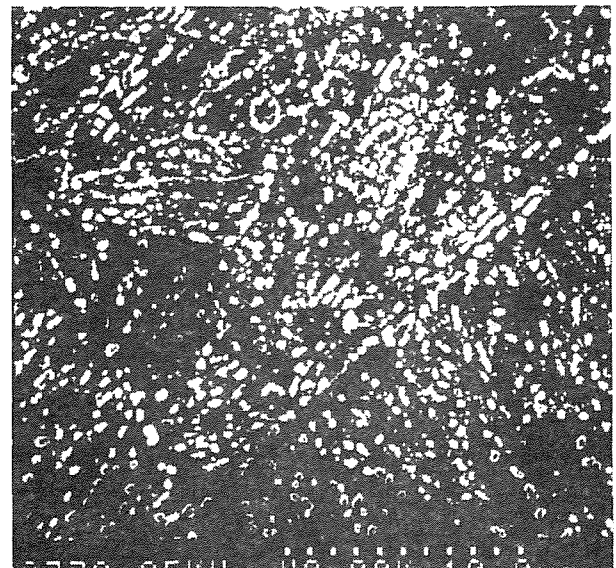


Figura 3. Magnificación de las bandas oscuras

El análisis llevado a cabo con SEM se completó con TEM, constatando esta distribución asimétrica de carburos en zonas preferenciales como límites de grano, límites de subgrano y en colonias interiores, aunque en todos los casos mostrando una orientación preferente

Asimismo, del análisis TEM es posible determinar la densidad de dislocaciones que muestra al igual que los precipitados de carburos una gran variabilidad, desde

zonas con gran concentración de dislocaciones a otras prácticamente limpias

Los ensayos de tenacidad de fractura se efectuaron con arreglo a la norma ASTM E 813-81 con probetas CT standard de 1 y 1/2 " de espesor, a las probetas de 1/2" se les mecanizó una entalla lateral con el objeto de crear un factor de concentración de tensiones que permitiera realizar el ensayo en un estado de deformación plana, a diferencia de las CT de 1" a las que no fué necesario practicar ningún tipo de entalla lateral, ya que por su mayor espesor el criterio de deformación plana quedaba asegurado.

Equipo experimental

Los totalidad de ensayos de tenacidad de fractura fueron llevados a cabo en una máquina universal de ensayos de la marca MTS modelo 810, equipada con un pequeño horno para temperaturas superiores a la ambiente.

El péndulo instrumentado empleado en la realización de este trabajo es de la marca WOLPERT, con una energía máxima de 300 J. Este péndulo cuenta con una tarjeta de adquisición de datos de 1 Mb y su correspondiente software.

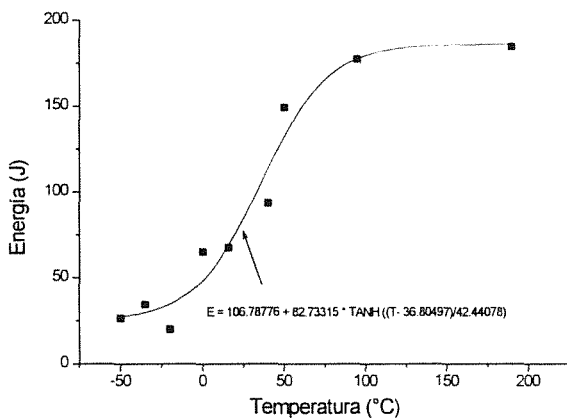


Figura 4. Curva Energía-Temperatura para el acero A 533 B1

Se ha perfeccionado también un software propio para el tratamiento y análisis de la señal que ha sido ya empleado con éxito [2] en trabajos anteriores. En esta etapa se ha sistematizado la localización de puntos críticos del ensayo (ya discutidos en otros trabajos) permitiendo determinar parámetros como la integral J y el factor de concentración de tensiones K_j (dependiente de la integral) al igual que las curvas de respuesta al impacto [3] en cualquier punto de interés.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron un total de 10 ensayos Charpy a diferentes temperaturas para determinar la curva completa Charpy. Los resultados así obtenidos quedan reflejados en la figura 4.

Paralelamente se desarrollaron ensayos de tenacidad de fractura a dos diferentes temperaturas: ambiente y 120 °C para probetas CT con espesores ya comentados.

La determinación de los valores de K_j dinámicos presentó alguna dificultad inicial, dado que en la bibliografía consultada no existe un criterio unánime en la consideración del punto de inicio de grieta. Para solventar esta dificultad, establecimos un criterio propio que nos permitiera asignar un instante para el crecimiento crítico de la grieta, el cual, difiere de los criterios generalmente empleados por diversos autores [4], [5]

En nuestro caso tomamos como variable de análisis la flexibilidad de la probeta [5], que como es bien conocido para el caso de vigas apoyadas en dos puntos y con grieta central, depende directamente de la longitud de la grieta existente. De este modo, la variación de la flexibilidad en el tiempo podemos asociarla a variaciones en la velocidad de la grieta, y del mismo modo, variaciones en el tiempo de esta velocidad es asumible a fenómenos como detenciones y aceleraciones repentinas de la grieta, o lo que es lo mismo puntos críticos en el ensayo.

A diferencia de otros autores que trabajan directamente con el valor de la flexibilidad así definida, en nuestro caso, hemos empleado la inversa de la flexibilidad, cuyo sentido físico es más comparable al valor de la constante elástica del material. Hemos comprobado que este parámetro presenta variaciones más fácilmente detectables que el uso directo de la comentada flexibilidad.

El paquete de software desarrollado posibilita el análisis local de cualquier zona de las curvas obtenidas, al igual que filtrados selectivos, ajustes, regresiones, y en resumen cualquier tipo de análisis adicional de la señal digitalizada.

La sistemática de análisis en el caso de los ensayos en Charpy instrumentado pasa por un filtrado previo de la señal. De los diversos filtros digitales empleados, el que mejor reproduce la señal base ha sido Window tipo Hanning con 50 coeficientes, siendo necesaria una convolución de estos coeficientes con la señal original para obtener la señal filtrada

Una vez filtrada la señal completa se determina la curva Fuerza/desplazamiento, o lo que es lo mismo,

1/flexibilidad. El cálculo del desplazamiento ha llevado a cabo según las ecuaciones [6] :

$$v(t) = v_0 - \frac{\Delta t}{2m} \sum_{i=t_i}^t F_i - F_{i+1} \quad [1]$$

$$s(t) = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=t_i}^t v_i + v_{i+1} \quad [2]$$

Donde v_0 = Velocidad inicial
 F = Fuerza
 Δt = Intervalo de tiempo (1/ Frecuencia)
 m = masa de la cabeza del péndulo.

El aspecto que presenta esta curva es como el que se aprecia en la figura 5, con un marcado máximo seguido por una caída suave. Este tramo es el que contiene la mayor cantidad de información del ensayo.

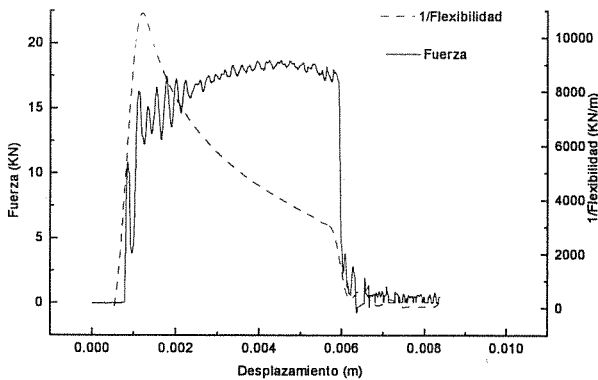


Figura 5. Curvas 1/Flexibilidad y Fuerza frente a desplazamiento

Siguiendo esta sistemática, la determinación del "General Yield" o límite elástico es inmediata, pues corresponde con el máximo de la citada curva.

Los puntos críticos de interés como punto de crecimiento estable de grieta, posibles detenciones, etc, se han determinado empleando la relación directa entre la longitud de grieta y el valor de flexibilidad de la probeta ya mencionados, de este modo, los puntos donde se anula la segunda derivada se han considerado como puntos críticos en los que se pueden dar alguno de los fenómenos comentados.

El análisis así seguido ha mostrado una gran variabilidad, pasando de probetas solamente con dos

puntos críticos (probetas con rotura frágil) a probetas con mas de cinco puntos a estudiar (probetas con comportamiento dúctil) generalmente ensayadas a elevadas temperaturas (> 100 °C)

De este modo el primer "cero" de esta función ha mostrado pocas variaciones de unas probetas a otras, habiéndose considerado como la iniciación del enromamiento del borde de grieta (recordemos que las probetas Charpy-V standard no han sido preagrietadas), descartando los valores así obtenidos en la determinación de la K_j dinámica.

El segundo "cero" se ha asociado con el punto de iniciación del crecimiento estable de la grieta, o lo que es lo mismo el punto el instante donde K_j supera al valor crítico del factor de intensidad de tensiones K_{IC} . En este punto se han determinado sistemáticamente los valores de K_j para todas las muestras ensayadas a diferentes temperaturas.

En cuanto a los ensayos cuasiestáticos de tenacidad de fractura con probetas CT se ha adoptado el valor K_{IC} como el obtenido por la norma E 813-81 en los ensayos considerados como "válidos" por la norma, es decir aquellos que cumplen la relación:

$$B, b_0 = 25 \frac{J_{IC}}{\sigma_y} \quad [3]$$

siendo J_{IC} = el valor crítico de J en el punto de iniciación de la grieta estable
 σ_y = Límite elástico efectivo del material a la temperatura de ensayo

Para poder relacionar datos de ensayos dinámicos con sus correspondientes estáticos a las mismas temperaturas se hizo necesario encontrar un parámetro que pudiera relacionar ambos. Se consideró que el módulo de elasticidad pudiera ser el nexa que nos sirviera para establecer la comparación entre ambos tipos de resultados.

Como es sabido, el módulo de elasticidad depende fuertemente tanto de la velocidad a la que se realiza el ensayo, como de la temperatura a la que se realice el mismo. Con esta filosofía, se evaluaron los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos en los ensayos Charpy, para lo cual, se recurrió a la formulación de la flecha obtenida en una viga entre dos apoyos:

$$D = \frac{P L^3}{48 E I_z} \quad [4]$$

En el que podemos considerar D como el desplazamiento obtenido en la ecuación [2], P la carga puntual en cada instante, L la distancia entre apoyos

(=40 mm) e I_z el momento de inercia de una sección transversal de área $a*b$ ($a = 10$ mm, $b = 8$ mm). El módulo de elasticidad así obtenido se representa en la figura 6 en función de la temperatura de ensayo.

Una vez obtenidos los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos se puede establecer la comparación directa entre K_j obtenida de los ensayos Charpy según [7]:

$$J = \frac{2 \text{ Energia}}{B (W - b)} \quad [5]$$

$$K_j = \sqrt{J E_{din}} \quad [6]$$

y K_{IC} obtenida de los ensayos de tenacidad de fractura. Los resultados entre los ensayos estáticos y dinámicos se muestran en la figura 7. La concordancia entre ambos resultados es satisfactoria, incluso en el caso de probetas CT de 1" donde el espesor de la probeta permite asegurar un estado de deformación plana a lo largo del ensayo, con resultados catalogados como validos por la norma.

El ajuste de los datos de K_j obtenidos por Charpy instrumentado a una curva del tipo:

$$K = A + B e^{(C * Temperatura)} \quad [7]$$

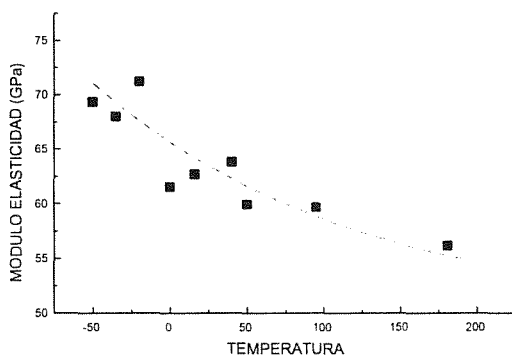


Figura 6. Módulo de elasticidad dinámico en función de la temperatura de ensayo

comúnmente utilizado, proporciona un buen ajuste, proporcionando datos comparables a los referenciados por otros grupos de investigación [8], lo que parece indicar que el procedimiento de análisis expuesto supone una fuente de datos de tenacidad de fractura comparables a los obtenidos por los tradicionales procedimientos de ensayos cuasiestáticos.

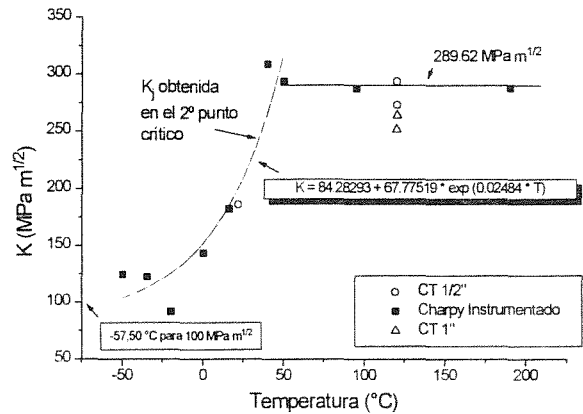


Figura 7. Comparación del factor de intensidad de tensiones en modo I para ensayos dinámicos y estáticos

Esto supone dos ventajas principales: a) el procedimiento de ensayo Charpy es más rápido y sencillo que el complicado montaje que requiere un ensayo típico de tenacidad de fractura, como por ejemplo el referido en nuestro trabajo (ASTM E 813) y b) el volumen del material a emplear se reduce considerablemente, lo que, en principio de cara a trabajar con material convencional no sugiere ningún tipo de ventaja, pero para el trabajo con material irradiado supone un éxito considerable. La reducción del volumen de las probetas a estudiar, conlleva un decrecimiento de la dosis de radiación emitida, y lo que es más importante, hace factible aumentar el número de probetas que pueden ser introducidas en las cápsulas de vigilancia, principal factor condicionante de los ensayos de tenacidad de fractura en los actuales procedimientos de vigilancia.

No obstante, es necesario aún un mayor número de ensayos con diferentes materiales, si bien los datos encontrados confirman que existe una relación clara y directa entre ensayos estáticos y dinámicos, necesita de un estudio más profundo y detallado.

Un interrogante de interés a tener en cuenta en ensayos Charpy instrumentado es la relación entre probetas preagrietadas y standard-V. Desgraciadamente, en este trabajo no hemos podido disponer de probetas preagrietadas para realizar esta comparación, aunque estimamos que la única diferencia entre ambos ensayos es poder establecer con la suficiente exactitud el punto de crecimiento estable de grieta. En el caso de probetas preagrietadas la longitud y el instante de crecimiento estable se pueden determinar de forma trivial. Las probetas standard, por el contrario, presentan la dificultad conocida de establecer el momento preciso en el que se produce el crecimiento de la grieta. Los resultados obtenidos en el presente trabajo, con la sistemática de análisis descrita evitan esta incertidumbre.

Esto hace directamente comparable las tenacidades obtenidas con probetas sin agrietar en los puntos críticos estudiados a las obtenidas con probetas preagrietadas. No obstante, este punto, como se ha comentado queda aun por comprobar.

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado y verificado una sistemática de análisis para ensayos charpy instrumentados que proporciona una herramienta de gran utilidad en la estimación de valores resistentes del material.

- Se ha podido verificar una significativa coherencia entre datos dinámicos y estáticos, que puede abrir nuevas expectativas en su campo de aplicación (p. ejem. análisis mas detallado de cápsulas de vigilancia, obtención de tenacidades de fractura desde ensayos charpy con menores incertidumbres, etc)

- Según los resultados de este análisis, parece factible obviar el preagrietamiento de las probetas Charpy-V, lo que implicaría una reducción en los costes del ensayo y minimiza el tiempo de manejo de material irradiado.

- Aparte de las buenas expectativas despertadas por lo hasta ahora expuesto es completamente necesario realizar análisis estadísticos en distintos materiales y condiciones de ensayo, para delimitar los rangos de aplicabilidad de la técnica de análisis descrita.

El trabajo realizado, cuya mayor parte de ha centrado en la interpretación y análisis de los datos procedentes de charpy instrumentado es solamente el comienzo de un análisis mas profundo, pues queda aun por determinar un buen número de variables puestas en juego en el ensayo. Una vía adicional que actualmente es objeto de estudio es el análisis modal del espectro obtenido en el ensayo. Este procedimiento, aunque de mayor complejidad y laborioso puede proporcionar resultados de interés que se sumaran a los hasta ahora encontrados, no obstante, la conclusión final de un proceso completo que permita extraer toda la información generada en un ensayo parece todavía un objetivo lejano. Actualmente estamos trabajando en la instrumentación de las probetas Charpy para constatar los resultados expuestos en este documento.

REFERENCIAS

- [1]. ASTM E 24.03.03, "Proposed Standard Method of Test for Instrumental Impact Testing of Precracked Charpy Specimens of Metallic Materials". Draft 2d, ASTM, 1981.
- [2]. J. Lapeña, F.J. Perosanz, J. Serrano "Reconstrucción de probetas Charpy: Estudio comparativo mediante péndulo instrumentado", Anales de Mecánica de Fractura, Vol 12. pág 419-425 (1995)
- [3]. J.F. Kalthoff, "On the measurement of dynamic fracture toughness - a review of recent work". International Journal of Fracture 27 (1985) pp. 277-298.
- [4]. A. Fabry, J. Van de Velde, " IAEA Specialists' Meeting on Irradiation Embrittlement and Mitigation". ESPOO, Finlad, October 1995
- [5]. T. Kobayashi, I. Yamamoto and M. Niinomi, "Evaluation of dynamic fracture toughness parameters by instrumented Charpy impact test", Engineering Fracture Mechanics Vol 24, No. 5, pp. 773-782, 1986
- [6]. Coz Díaz, J. J. del, Fdez. Canteli, A., Kalthoff, J. F., "Caracterización Dinámica de varios aceros de vía", Anales de Mecánica de Fractura, Vol. 11. pág 170-177. (1994).
- [7]. Rauno Rintamaa, "Single specimen fracture toughness determination procedure using instrumented impact test". VTT Technical Research Centre of Finland. ESPOO 1993
- [8]. Kim Wallin, "Comparison of the scientific basis of russian and european approaches for evaluating irradiation effects in reactor pressure vessels". AMES Report no. 3. ESPOO, February 1995