

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD DE COMPONENTES FISURADOS BASADA EN LA PARADA DE FISURA

C. Gallo, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana y A. Saiz

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Av. de los Castros s/n, 39005, Santander. Tfno. 942-201837

Resumen. El procedimiento habitual para diseñar componentes garantizando su integridad consiste en plantear cada elemento del sistema con valores de tenacidad a fractura superiores a los de trabajo. Sin embargo, existen numerosos casos como estructuras soldadas, defectos internos, etc., que se encuentran principalmente en grandes componentes como cascos de buques o vasijas a presión, en las que es imposible asegurar esta condición.

El procedimiento R6 se utiliza para diseñar en condiciones de seguridad frente a fractura basándose en el criterio de tenacidad a fractura. Este procedimiento general incluye un tratamiento específico para el caso de parada de fisura, que se basa en detener las grietas después de iniciar la propagación.

En este trabajo se estudia la integridad de grandes componentes fisurados por medio de los criterios de parada de fisura definidos en el método R6 y a través de nuevos criterios basados en aproximaciones energéticas, analizando en cada caso la respuesta ofrecida.

Abstract. The classic procedure used for designing components ensuring their integrity is based on the calculation of higher fracture toughness values than the working values for each system element. Nevertheless, there are many situations such as welded structures, internal defects, etc., that are found mainly in big components such as ship hulls or pressure vessels, in which it is impossible to assure that condition.

Based on the fracture toughness criterion, the R6 procedure is used for the design under security conditions against fracture. A complementary criterion, that is also included in the procedure, is known as Crack Arrest, which is based on arresting cracks once they have been initiated.

The integrity of large flawed components is studied in this work through the crack arrest criterion defined in the R6 method, and also through a new criteria based on energetic approaches, analysing in each case the offered response.

1. INTRODUCCIÓN

El procedimiento utilizado habitualmente en la etapa de diseño para establecer la integridad de componentes y estructuras consiste en diseñar cada elemento del sistema con unos valores de tenacidad a fractura superiores a la fuerza inductora del proceso de fisuración.

Sin embargo, se presentan numerosas situaciones en las que es imposible asegurar esta condición. Generalmente son casos de estructuras con zonas localmente frágiles, como soldaduras, defectos internos, concentraciones de tensiones, etc. Estas condiciones se producen especialmente en grandes componentes como cascos de buques, vasijas a presión o sistemas de tuberías.

El procedimiento R6 se utiliza desde 1976 para diseñar en condiciones de seguridad frente a fractura. Este procedimiento tiene como objetivo predecir las condiciones de fallo de la estructura, teniendo en cuenta

que éste puede producirse según dos modos diferentes, la fractura o el colapso plástico. De acuerdo a este planteamiento, la iniciación de una propagación de fisura inestable o el colapso plástico del componente no se llegan a producir si no son superadas las condiciones límites asociadas a la tenacidad del material.

Un criterio de diseño complementario que también se incluye en el procedimiento se basa en el concepto de Crack Arrest o parada de fisura. Este criterio, basado en la detención de las fisuras después de iniciarse la propagación en el interior del componente, evalúa las condiciones límites de parada en función de parámetros propios de la mecánica de la fractura como la tenacidad en parada de fisura K_{Ia} o la temperatura de parada de fisura CAT.

En este trabajo, como aplicación al estudio de la integridad de grandes componentes fisurados, se han analizado las condiciones de parada de fisura de varios ejemplos siguiendo los criterios definidos en el

procedimiento R6 así como por medio de nuevos criterios basados en aproximaciones energéticas, analizando la respuesta ofrecida en cada uno de los casos.

2. PROCEDIMIENTO R6

El procedimiento R6, que permite evaluar la integridad de componentes fisurados, se ha utilizado de forma generalizada desde 1976 y permanece en continua actualización, encontrándose en estos momentos en su revisión número cuatro [1]. Este método de aplicación general se basa en la utilización de los diagramas de fallo (FAD) para la evaluación de las estructuras.

Los contenidos del procedimiento están en consonancia con numerosas normas como la británica BS 7910 1999 o la americana API 579, códigos como el japonés JSME o procedimientos de evaluación de componentes fisurados como el Europeo SINTAP, puesto que todos ellos contemplan aspectos pertenecientes al método R6 como herramientas de análisis [2]. En concreto, la norma BS 7910 1999 [3], contiene el diagrama de análisis de fallo (FAD) o los argumentos de fuga antes de rotura, la norma API 579 [4], y el código JSME, también incluyen el FAD como herramienta para valorar la integridad de los componentes. Por otra parte, el procedimiento SINTAP [5], presenta gran afinidad con los fundamentos del R6 puesto que presenta un diagrama de fuerza motriz de agrietamiento (CDFD) como alternativa al FAD pero con el mismo fundamento que éste.

El criterio de diseño del R6 está basado en la tenacidad a fractura, contemplando dos posibles modos de fallo, la fractura inestable o el colapso plástico. La fractura inestable se analiza mediante los campos de tensión-deformación locales en el fondo de entalla, mientras que el colapso plástico se controla por medio del límite de plastificación de la sección crítica.

El procedimiento de análisis seguido consiste en determinar dos parámetros de cálculo, K_r y L_r , dependientes de las cargas aplicadas en la estructura, las propiedades mecánicas del material y la geometría, que incluye el tamaño de fisura y su forma. Cada pareja de valores de estos dos parámetros se representa como un punto en un diagrama de análisis de fallo (FAD). Su posición se compara con una curva de contorno que viene dada por la condición límite de fractura, definida por una parte por K_r en función de L_r ($K_r = f(L_r)$) y por otra parte mediante un valor de L_r máximo determinado por la condición del colapso plástico. A partir de esta representación se pueden obtener dos posibles resultados: evitar el fallo de la estructura si el punto de valoración se encuentra dentro del contorno definido por $K_r = f(L_r)$ y L_r máximo, o superar las condiciones límites por quedar el punto fuera de la curva, con lo cual no existe seguridad de que se pueda evitar el fallo catastrófico de la estructura.

En la Fig. 1, se muestra un diagrama de fallo como ejemplo de aplicación del R6 [6], en el cual puede verse la curva de contorno que separa las zonas de seguridad e inseguridad junto a la curva que representa los resultados obtenidos en un ensayo, que muestra la variación de las condiciones de tenacidad a lo largo de dicho ensayo. Dependiendo de los valores que se obtienen durante el ensayo se estará en zona de seguridad o fuera de ella.

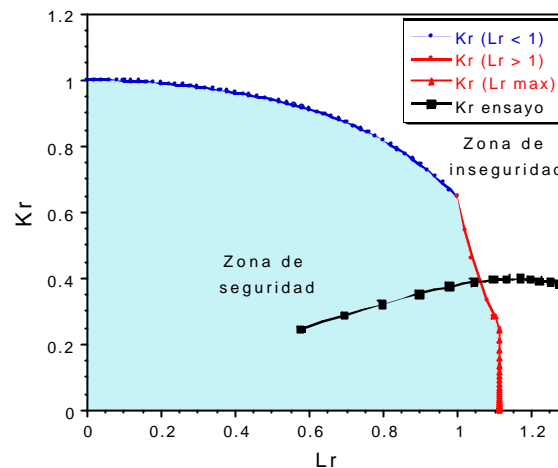


Fig. 1. Representación típica de un FAD.

Este método de evaluación tiene sin embargo, limitaciones que necesitan una aproximación alternativa. Uno de estos casos lo representa el crecimiento inestable de fisuras. El procedimiento R6 recoge como herramienta alternativa en los procesos de evaluación de la integridad estructural el diseño basado en condiciones de parada de fisura. El criterio contempla la posibilidad de que se produzca la parada de fisuras que propagan de forma frágil. Para ello evalúa los parámetros característicos del proceso de parada en términos pertenecientes a la mecánica de la fractura, como son la tenacidad a fractura en parada de fisura K_{Ia} o la temperatura de parada de fisura CAT.

En la Fig. 2 se presenta la relación existente entre las dos metodologías de valoración de la integridad estructural comprendidas en el procedimiento R6, la tenacidad a fractura y la parada de fisura.

En la actualidad se recurre a la tenacidad a fractura como primer procedimiento para valorar la estructura, puesto que se encuentra más desarrollado que la parada de fisura. Para obtener un resultado satisfactorio se deben garantizar las condiciones de diseño (un FAD con resultados dentro del área de seguridad). Cuando no se cumplen estas condiciones se analiza la estructura desde el punto de vista de la parada de fisura. Como muestra el esquema, también se llega al resultado en el que se cumplen los argumentos de la integridad estructural obteniendo una parada de fisura antes de alcanzar un tamaño de grieta crítica. Por el contrario, en caso de existir propagación hasta el fallo se llega a un estado de no cumplir los argumentos de la integridad.

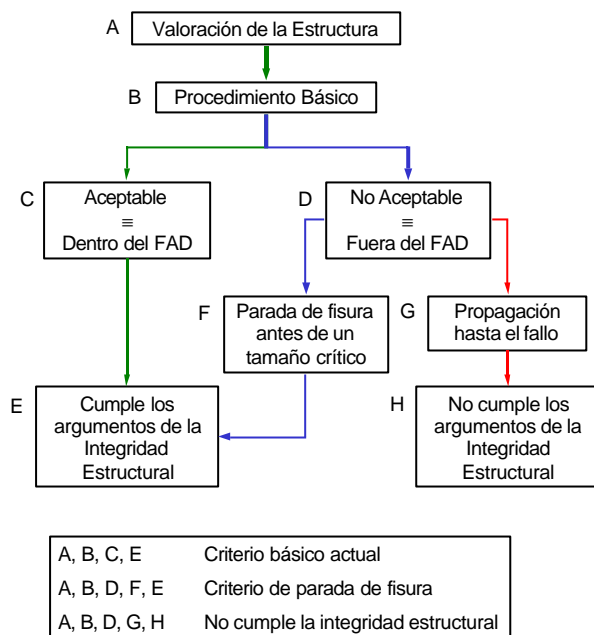


Fig. 2. Relación entre criterios de valoración de una estructura fisurada [1].

Existen diferentes casos de estructuras fisuradas en los que aún después de iniciarse la propagación se puede asegurar de una manera fiable su integridad mediante el criterio de parada de fisura. Ejemplos de estructuras sometidas a propagaciones de carácter diverso, como las orientadas hacia zonas de reducción del estado tensional, las debidas a choques térmicos con gradiente de temperatura positivo, las que avanzan desde un área localmente frágil, las que recorren zonas de variación de tenacidad o las que se producen como consecuencia de la aplicación de una carga momentánea, son los casos más indicados para aplicar el criterio de parada de fisura definido en el procedimiento R6.

La valoración según este criterio puede realizarse mediante un análisis estático o dinámico. La Fig. 3 muestra el proceso seguido en el método R6 para la aplicación del criterio de parada de fisura utilizando un análisis estático.

El primer paso consiste en determinar el camino de propagación de fisura en función del estado tensional de la estructura. Posteriormente se determina la temperatura de trabajo (T_{op}) y se verifica si existen datos experimentales para conocer la temperatura de parada de fisura del material. En el caso de que sea posible, se obtiene el valor de CAT para las condiciones de tensión existentes y del espesor del material utilizado, estableciendo la comparación entre los resultados de CAT y temperatura de trabajo. Si la temperatura de trabajo supera el valor de CAT, la parada de fisura es posible antes de provocar un fallo de la estructura. En el caso de no cumplir esta relación o de que no se disponga de resultados de CAT, será necesario realizar un análisis estructural estático de tensiones, determinando el factor de intensidad de tensiones

aplicado (SIF) para un tamaño de fisura igual al valor de parada y un factor de seguridad f_s . Asimismo, será necesario determinar el factor de intensidad de tensiones en parada de fisura K_{Ia} a la temperatura de ensayo (T_{op}). A partir de estos resultados se puede establecer de nuevo la comparación para determinar las condiciones de parada de fisura. En este caso se comparan los valores de factor de intensidad de tensiones aplicado, al cual se le añade el factor f_s , y tenacidad a fractura en parada de fisura. Si el producto de SIF por f_s es menor que el valor de K_{Ia} , se estará en disposición para que la fisura que inicie la propagación pueda detenerse.

En cualquiera de las dos situación en que se obtiene la parada de fisura, por medio de la comparación de temperaturas o por el análisis tensional, será necesario un último paso consistente en realizar un análisis de estabilidad al desgarro y de carga límite en parada de fisura.

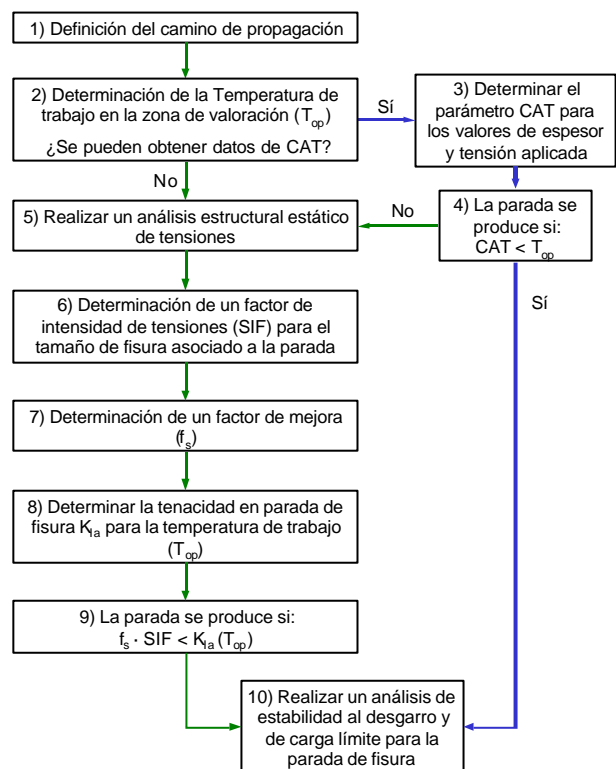


Fig. 3. Procedimiento del criterio de parada de fisura estático contemplado en el R6 [1].

Dependiendo de los medios disponibles en un laboratorio de ensayos mecánicos es posible caracterizar las propiedades de los materiales estudiados, pudiendo ser determinados los parámetros CAT o K_{Ia} de forma directa o indirecta. Los ensayos a gran escala como el DTT o el intermedio [7] permiten obtener de forma directa el valor de CAT o de K_{Ia} . Por medio del ensayo CCA [8] también se puede calcular directamente el valor de K_{Ia} . Por último, a través de ensayos a pequeña escala es posible determinar ambos parámetros pero de forma indirecta [9].

Otro método para valorar la estructura mediante el criterio de parada de fisura consiste en realizar un análisis basado en términos dinámicos de la mecánica de la fractura. Para ello, se trata de obtener el factor de intensidad de tensiones dinámico K_I^{dyn} y compararlo con la tenacidad en parada de fisura dinámica K_{IA} [1]. Este método puede ofrecer un análisis más apropiado de la estructura, pero actualmente no es posible llevar a cabo ensayos dinámicos para, por ejemplo, determinar el valor de K_{IA} en un material. Por lo tanto, un análisis estático puede ser suficiente para evaluar la estructura fisurada.

3. CRITERIOS ENERGÉTICOS

El criterio energético se fundamenta en la relación que existe en la estructura fisurada entre las energías implicadas en el proceso de propagación. Este criterio se basa en el establecimiento de un balance en el que partiendo de una energía inicial (U_i) de la estructura, se compara la energía disponible (U_a) frente a la necesaria para producir la propagación de la fisura (U_s). De este modo es posible determinar la longitud de grieta propagada en la estructura [10]. Cada componente de energía tiene las siguientes expresiones:

$$U_i = H_i B W \quad (1)$$

Siendo H_i la energía elástica inicial por unidad de área, cuya expresión es:

$$H_i = \frac{\sigma^2 \cdot L}{2 \cdot E} \quad (2)$$

y las variables B igual al espesor de la pieza (mm), W la anchura (mm), σ la tensión aplicada en la sección (MPa), L la longitud efectiva (mm) y E el módulo de elasticidad en (MPa).

$$U_s = R_s B a_p \quad (3)$$

donde R_s es la energía específica media empleada en la propagación (U/A) desde el inicio de fisura hasta el fondo de entalla, que equivale a la longitud propagada a_p .

Por tanto, la energía específica disponible es la diferencia entre ambas. En el momento en que la disponible sea igual o menor que la necesaria para propagar la fisura se producirá la parada de fisura.

$$U_a = U_i - U_s = H_i B W - R_s B a_p \quad (4)$$

De este modo, en el momento de producirse la parada de fisura, cuando U_a es igual a U_s , la longitud propagada será igual a:

$$a_p = \frac{H_i \cdot W}{2 \cdot R_s} \quad (5)$$

Para determinar el valor de R_s es necesario llevar a cabo ensayos que permitan obtener los resultados de energía por unidad de área (U/A), lo cual puede obtenerse mediante ensayos de propagación de energía dinámico o ensayos Charpy instrumentados.

4. APLICACIÓN: COMPONENTES FISURADOS

Una de las aplicaciones del procedimiento R6 desde el punto de vista del criterio de parada de fisura puede referirse a situaciones en las que se trabaja a muy bajas temperaturas. Casos como los de cascos de buques o los tramos de sistemas de tuberías que soportan habitualmente condiciones de trabajo desfavorables, son ejemplos típicos donde se puede aplicar la parada de fisura.

El análisis desde el punto de vista de este criterio debe realizarse con aceros empleados en la construcción de esta serie de componentes. Los aceros estructurales Grade A y AH32 como ejemplos de aceros empleados en la construcción de cascos de buques y el X80 como ejemplo de la construcción de sistemas de tuberías para transporte de gas y petróleo, son utilizados en este trabajo para comparar los diferentes procedimientos de valoración presentados.

Los valores de composición química más significativos están indicados en la Tabla 1 y sus propiedades mecánicas se incluyen en la Tabla 2 [7]. El acero Grade A se obtiene en procesos de laminación y procede de chapa de 15 mm de espesor, mientras que el acero AH32, normalizado y tratado termomecánicamente, posee un espesor de 25 mm. El acero X80, denominado según API, se obtiene mediante proceso de laminación controlada a partir de chapa de 26 mm de espesor.

Tabla 1. Composición química (%).

Elemento	Grade A	AH32	X80
C	0.13	0.099	0.07
Si	0.24	0.26	0.18
Mn	0.66	1.30	1.83
P	0.015	0.019	162 ppm
S	0.016	0.004	45 ppm
Cr	< 0.02	0.020	-
Ni	< 0.02	0.020	0.03
Ceq.	0.243	0.321	0.43

Tabla 2. Propiedades mecánicas.

Acero	Grade A		AH32		X80	
	LT	TL	LT	TL	LT	TL
σ_Y (MPa)	272.5	274.0	388.5	398.5	589.0	621.3
σ_u (MPa)	450.0	455.2	504.0	509.1	666.9	691.0
ϵ_{max} (%)	16.3	17.2	15.7	15.6	6.0	6.4

Los componentes realizados a partir del acero Grade A tienen aplicaciones en condiciones de temperaturas próximas a cero grados o incluso por debajo, como por ejemplo en el caso de buques que navegan por el Mar del Norte, donde se estima una temperatura de operación de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]. Asimismo, se considera que las tensiones aplicadas en estas condiciones de trabajo son de 100 MPa. Los componentes realizados con el acero AH32 destinados a cascos de buques pueden trabajar en esas mismas condiciones de temperatura pero suelen soportar mayores niveles de tensión aplicada. Por otra parte, los componentes realizados con el acero X80 pueden alcanzar temperaturas de trabajo en torno a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, como en los sistemas de tuberías situados en Alaska, y niveles de tensión también superiores a los del acero Grade A.

En este trabajo se incluyen los resultados de diferentes ensayos DTT e intermedios llevados a cabo con los aceros estudiados bajo diferentes condiciones de trabajo [7]. Estos resultados pueden verse representados en la Fig. 4, expresados en términos de tensión aplicada frente a temperatura de parada de fisura.

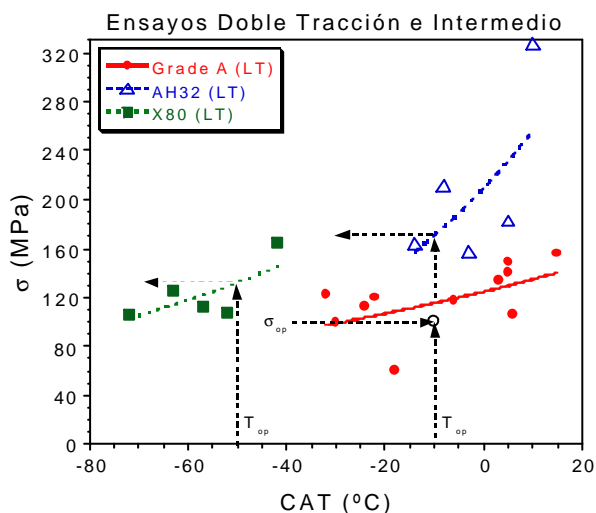


Fig. 4. Resultados de temperatura de parada de fisura.

Los resultados obtenidos han sido ajustados mediante funciones exponenciales, con las cuales se consigue aproximar de manera correcta la relación entre tensión aplicada y temperatura de parada. Asimismo, en la figura se han representado los puntos correspondientes a las condiciones de trabajo de cada acero para comprobar si se encuentran en zona de seguridad o de inseguridad. De este modo, es posible determinar si la estructura podrá detener o no una fisura que inicie la propagación bajo dichas condiciones operativas.

En el caso del acero Grade A, las condiciones de trabajo se encuentran debajo de la curva de interpolación, con lo cual se sitúa en la zona de seguridad. Sin embargo, los resultados ofrecen una dispersión que no permite

asegurar completamente esta afirmación. Para los aceros AH32 y X80 se han determinado las tensiones máximas de trabajo para las temperaturas de operación. Se obtienen unos valores de 170 y 130 MPa respectivamente. En el caso del acero AH32 se obtiene mayor grado de dispersión, por lo que debe mantenerse un margen de seguridad.

Cuando los resultados de CAT no permiten definir una curva fiable de la relación tensión aplicada y temperatura de parada, puede ser necesario un análisis con mayor número de resultados, lo cual se consigue a partir de los factores de intensidad de tensiones siguiendo los pasos definidos por el procedimiento. Los ensayos CCA, así como los DTT o Intermedio permiten calcular la tenacidad en parada de fisura K_{Ia} de forma directa. La comparación frente al factor de intensidad de tensiones aplicado permite determinar la integridad de la estructura fisurada, tal como aparece señalado en el procedimiento descrito en la Fig. 3.

La alternativa al criterio de parada de fisura que se ha presentado consiste en realizar el balance de energía de la estructura fisurada. En primer lugar es necesario conocer los resultados de energía de rotura por unidad de área (U/A) de los aceros estudiados. Estos resultados han sido obtenidos por medio de ensayos Charpy instrumentados como alternativa a los inicialmente propuestos de propagación de energía dinámicos, puesto que se ha comprobado que ofrecen resultados más fiables [7]. A partir de estos resultados es posible determinar los parámetros de energía específica R_k de cada acero, para posteriormente compararlos con los valores de energía elástica H_i mediante la ecuación (4).

Por medio de este balance se pueden predecir las condiciones de parada de fisura para una estructura sometida a un estado tensional y de temperatura concreta. Con el objetivo de establecer un criterio comparativo con respecto al convencional, estas predicciones han sido evaluadas sobre los ensayos DT e intermedio realizados sobre los aceros estudiados.

La Fig. 5 presenta las predicciones de CAT frente a los resultados obtenidos experimentalmente. En dicha figura se observa el grado de aproximación entre las predicciones de CAT y los valores reales. La fiabilidad del método predictivo es comparable al procedimiento descrito en R6, pudiendo establecerse un margen de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ como zona de incertidumbre en las predicciones.

Una vez comprobada su validez, las predicciones permiten estimar un valor aislado de CAT en el contexto de una serie de resultados, puesto que es posible establecer múltiples hipótesis con diferentes condiciones de ensayo en cuanto a tensión aplicada o distribución de temperaturas. Asimismo, en esa serie de resultados permiten determinar si un ensayo a gran escala presenta o no resultados coherentes.

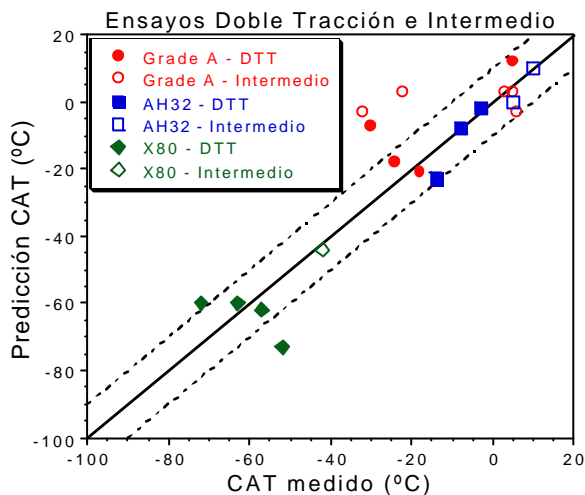


Fig. 5. Comparación de metodologías.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento R6 de evaluación de la integridad de componentes fisurados, constituye una herramienta de diseño muy útil y avanzada, que además sirve de referencia a otros procedimientos o normas existentes. En dicho procedimiento, la tenacidad a fractura se emplea habitualmente para asegurar la integridad estructural de esta clase de componentes. Su análisis basado en dos posibles modos de fallo, la fractura frágil y el colapso plástico, y un diagrama de análisis de fallo (FAD), permite evaluar las condiciones límites de trabajo. Sin embargo, existen casos de estructuras fisuradas en las que es imposible asegurar totalmente que no sucedan fallos catastróficos.

El criterio de parada de fisura se contempla en el procedimiento R6 como complemento al criterio de tenacidad y como un medio más seguro para garantizar la integridad en estas situaciones. Éste se basa fundamentalmente en asegurar que la temperatura de trabajo del componente a evaluar se encuentra por encima de CAT y/o que la fuerza inductora de propagación de fisuras K_I sea menor, en algún punto, que K_{Ia} . El criterio presenta el inconveniente de la dificultad para determinar resultados de CAT o K_{Ia} , puesto que la forma directa resulta muy costosa y presenta dispersión, mientras que las opciones indirectas tienen menor precisión.

Existe un procedimiento alternativo a este criterio que se basa en realizar un balance entre la energía necesaria para propagar y la disponible en la estructura, proponiendo como condición de parada que la energía elástica disponible inicialmente ha sido consumida en la propagación realizada.

En este trabajo se han evaluado ambas metodologías aplicándolas en ensayos a gran e intermedia escala, DTT e IT, sobre aceros de cascos de buques y de tuberías para oleoductos. Se ha comprobado que el criterio de parada de fisura permite estimar si las

condiciones operativas pueden quedar del lado de la seguridad, siendo favorable en el caso analizado a pesar de existir una ligera dispersión. Asimismo, se han determinado los mismos resultados mediante el criterio energético, comprobando que presentan buena relación con respecto al criterio convencional.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se extrae del trabajo realizado con la subvención de los proyectos “An Energy Balance Approach For Crack Arrest”. ECSC n° 7210/PR/182 y “Estudio de la Parada de Fisuras a Partir de Balance Energético” CICYT (proyecto n° MAT2000-2819-CE).

REFERENCIAS

- [1] “Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects”, R6, Revision 4, British Energy, (2001).
- [2] Budden P. J., Sharples J. K., Dowling A. R., “The R6 procedure: recent developments and comparison with alternative approach”, International Journal of Pressure Vessel & Piping, n° 77, pp. 895-903, (2000).
- [3] “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures”, BS 7910, London, British Standards Institution, (1999).
- [4] Recommended practice for fitness-for-service. API 579, American Petroleum Institute, Issue 12, (1999).
- [5] “Structural integrity assessment procedures for European industry”, SINTAP, Final Procedure, (1999).
- [6] “Application of New Fracture Mechanics Concepts to Hydrogen Damage Evolution”, ECSC Contract N° 7210-PE-110. Final Report, (2002).
- [7] “An Energy Balance Approach for Crack Arrest”, Draft Final Report, ECSC, 7210.PR/182, (2003).
- [8] “Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} of Ferritic Steels”, ASTM E 1221-96 (1996).
- [9] Gallo C., Álvarez J. A., Gutiérrez-Solana F. y Saiz A., “Obtención del factor de Intensidad de Tensiones en Parada de Fisura (K_{Ia}) Para Aceros Estructurales Por Medio de Ensayos Charpy Instrumentado y Crack Arrest Compacto”, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. 20, pp. 308-313, (2003).
- [10] Priest A. H., “An energy balance in crack propagation and arrest”, Engineering Fracture Mechanics, 61, pp. 231-251, (1998).
- [11] “Steel selection criteria for fracture avoidance in welded ships”, Final Report, ECSC project. 7210/KA/824, (1999).