

UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LOS DIFERENTES ENFOQUES INGENIERILES PARA LA EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE BAJO CONFINAMIENTO TENSIONAL.

S. Cicero, F. Gutiérrez-Solana. J.M. Varona

Universidad de Cantabria, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
Av/Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria, Spain
ciceros@unican.es

RESUMEN

En las dos últimas décadas el confinamiento ha sido una de las mayores áreas de investigación en mecánica de la fractura e integridad estructural. La posibilidad de realizar evaluaciones más ajustadas y menos conservadoras (permaneciendo del lado de la seguridad) requiere, en muchos casos, la consideración de las condiciones de confinamiento tensional en el frente del defecto, con el objetivo de realizar mejores predicciones de la capacidad resistente de un componente o del tamaño crítico de defecto correspondiente. A este respecto, se han propuesto diversas metodologías, desde aquellas basadas en modelos micromecánicos (enfoques locales) o métodos energéticos, hasta los basados en enfoques ingenieriles. De entre estos últimos destacan las propuestas de la mecánica de la fractura biparamétrica y, en especial, dos de sus metodologías: la corrección biparamétrica de K_{IC} y la corrección biparamétrica del CTOD.

Desde un punto de vista práctico, los anteriormente llamados enfoques ingenieriles tienen un interés máximo. En este trabajo se presenta una completa revisión de este tipo de metodologías, con especial atención a la propuesta de corrección de confinamiento del FITNET FFS Procedure y a la metodología IST. De igual forma, se valoran las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, así como las posibles interacciones entre ambos.

ABSTRACT

In the last two decades, constraint has constituted one of the major issues in fracture mechanics and structural integrity research. The possibility of performing more adjusted less conservative (and still safe) assessments requires, in many cases, the consideration of the constraint conditions in the crack tip in order to make better predictions of the load bearing capacity or the critical crack dimensions. Several methodologies have been proposed, from those based on micromechanical models (local approaches) or energy methods to those based on engineering approaches. Among the latest, two methodologies stand out: the biparametric correction to K_{IC} and the biparametric CTOD constraint correction.

From a practical point of view, the so called engineering approaches are of maximum interest. Here, a complete overview of such methodologies is presented, with special emphasis on the FITNET FFS Procedure proposal for the assessment of loss of constraint and also on the IST methodology. Advantages and disadvantages of both approaches are also discussed, as well as the possible interactions between them.

PALABRAS CLAVE: Confinamiento, tensiones, defecto, FITNET, CTOD.

1. INTRODUCCIÓN

Una fuente de conservadurismo implícita en muchas evaluaciones de integridad estructural es el hecho de que el valor de la tenacidad a fractura utilizado en el cálculo es obtenido a partir de probetas con fisuras profundas sometidas a cargas predominantemente flectoras, de acuerdo con las distintas normas existentes. Sin embargo la resistencia a fractura del material es mayor cuando los ensayos se realizan sobre probetas con fisuras superficiales y/o sometidas a cargas de tracción [1-3], dado que bajo esas condiciones surgen tensiones hidrostáticas y tensiones principales máximas

menores en el frente de fisura, lo que genera un menor grado de confinamiento y un aumento de la resistencia a fractura (tanto frágil como dúctil) del material.

En los últimos años se han desarrollado diversas metodologías para cuantificar la dependencia geométrica de la resistencia a fractura del material mediante el uso de los denominados parámetros de confinamiento. Son varias las teorías o metodologías existentes para el análisis del confinamiento en estructuras fisuradas. Las más comúnmente aceptadas son las aproximaciones locales, los métodos energéticos y la mecánica de la

fractura biparamétrica. Esta última, la más utilizada en la práctica y la analizada en este trabajo, postula que basta con la definición de un segundo parámetro de fractura para la consideración del efecto del confinamiento. Una vez definido dicho parámetro, la evaluación del componente resulta relativamente sencilla. Por esta razón, y porque desde el punto de vista práctico proporciona resultados que pueden llegar a ser tan próximos a la realidad como los proporcionados por otras metodologías con (quizá) mayor base física, en este trabajo se van a denominar “enfoques ingenieriles” a las metodologías de evaluación de la pérdida de confinamiento basadas en la mecánica de la fractura biparamétrica.

2. LA MECÁNICA DE LA FRACTURA BIPARAMÉTRICA

Tomando la integral J como la fuerza motriz, la mecánica de la fractura biparamétrica asume que el crecimiento de fisura a lo largo del frente, s, está gobernado por la expresión:

$$J(s; P, a) = J_R(\Delta a(s), \kappa(s), \text{Temperature}) \quad (1)$$

en donde P es la carga aplicada, a es la longitud de fisura, κ es el parámetro de confinamiento y J_R es una función del material que depende del crecimiento de fisura, Δa .

Se han propuesto diferentes parámetros de confinamiento. Tradicionalmente los más utilizados son la tensión T, el parámetro Q y el parámetro h, aunque en el apartado 4 dedicado a la metodología IST se presentará el parámetro β .

La tensión T se define como el segundo término de la serie de Williams para el campo elástico de tensiones en el frente de una fisura:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T \delta_{ij} \quad (2)$$

en donde K_I es el factor de intensidad de tensiones, δ_{ij} es la delta de Kronecker y $f_{ij}(\theta)$ son funciones de posición en el entorno del frente de fisura.

Los campos de tensiones y deformaciones en el interior de la zona plástica (asumiendo la teoría de pequeñas deformaciones) pueden expresarse de forma aproximada como la solución HRR más un término adicional que representa términos de mayor orden. O'Dowd y Shih [2] proponen la siguiente formulación:

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_{HRR} + Q \sigma_0 \delta_{ij} \quad (3)$$

en donde σ_0 es el límite elástico. Estos autores definen el parámetro Q en base a la tensión normal al plano de la fisura:

$$Q = \frac{\sigma_{yy} - (\sigma_{yy})_{T=0}}{\sigma_0} \quad (4)$$

En condiciones de plastificación a pequeña escala, T y Q están relacionados entre sí, siendo la relación dependiente del comportamiento plástico del material.

No hay un acuerdo general acerca de cuál de estos parámetros de confinamiento es el más adecuado.

3. ANÁLISIS DEL CONFINAMIENTO SEGÚN EL PROCEDIMIENTO FITNET FFS

La metodología utilizada por el FITNET FFS [3], antes de la metodología de análisis del confinamiento (apartado 6.4.3 del procedimiento) recoge, en el punto 6.2.3.10, orientaciones sobre la aplicación de este tipo de análisis:

- El beneficio es mayor en componentes sometidos predominantemente a cargas de tracción (frente a las cargas de flexión).
- Los efectos del confinamiento son más significativos en componentes estructurales con defectos superficiales.
- El beneficio proporcionado por el análisis es pequeño en materiales dúctiles analizados con valores de tenacidad asociados al inicio de la propagación, dado que este fenómeno es poco sensible al confinamiento. Implícitamente, indica que este tipo de análisis ha de realizarse con enfoque de desgarro dúctil, más sensible al confinamiento que la iniciación.
- El beneficio es pequeño para valores bajos del parámetro L_r (relación entre la carga aplicada y la de colapso plástico). La razón es que para que la pérdida de confinamiento se va produciendo a medida que aumenta la carga, y valores de L_r reducidos implican cargas bajas.
- El beneficio es reducido en situaciones dominadas por el colapso plástico.

Una vez en el punto 6.4.3, el FITNET FFS propone el enfoque biparamétrico para las evaluaciones de confinamiento en forma de dos alternativas diferenciadas, aplicable tanto al análisis de iniciación como al de desgarro dúctil: el Procedimiento I, mostrado en la Figura 1, consiste en modificar el Diagrama de Fallo (FAD) manteniendo invariable la tenacidad a fractura utilizada para definir K_{rc} ; el Procedimiento II, por su parte, modifica la tenacidad y mantiene invariable el FAD utilizado en cálculos ordinarios. Como puede observarse en la Figura 1, un punto inicialmente situado fuera del Diagrama de Fallo (y,

por lo tanto, evaluado como situación de fallo) puede finalmente quedar dentro del FAD corregido por confinamiento (y, por lo tanto, quedando demostrada su situación segura frente al fallo).

En el Procedimiento I el FAD modificado resulta:

$$K_r = f(L_r)(1 + \alpha(-\beta L_r)^k) \quad ; \quad L_r \leq L_{rmax} \quad (5)$$

en donde α y k son constantes del material que definen la influencia del confinamiento en la tenacidad a fractura y β es una medida normalizada del confinamiento estructural que no hay que confundir con la β de la metodología IST presentada más adelante.

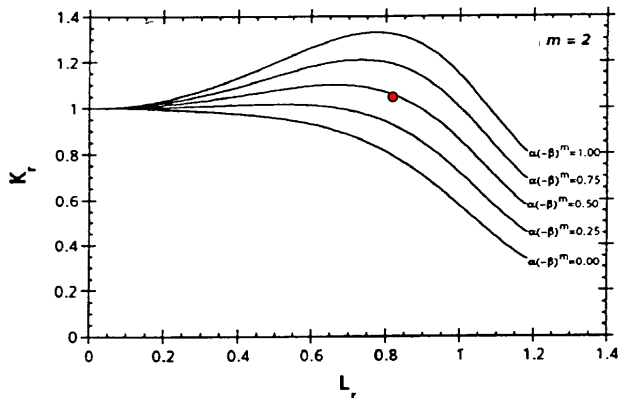


Figura 1. Modificaciones del FAD para distintos valores de los parámetros del material α y k y niveles de confinamiento β (<0).

β puede definirse en función de la tensión T (expresión (6)) o en función del parámetro Q (expresión (7)):

$$\beta_T = \frac{T^p}{L_r \sigma_y} + \frac{T^s}{L_r \sigma_y} \quad (6)$$

$$\beta_Q = \frac{Q}{L_r} \quad (7)$$

en donde T^p y T^s son los valores de la tensión T correspondientes a las tensiones primarias y secundarias.

El método también incorpora una metodología desarrollada en el proyecto VOCALIST [4] que permite obtener los valores de los parámetros α y k a partir del límite elástico y del coeficiente de endurecimiento por deformación del material, así como de su parámetro de forma de la tensión de Weibull, m . Por lo tanto el FITNET, en su propuesta biparamétrica del análisis del confinamiento, hace uso de resultados obtenidos a partir de un modelo de aproximación local (Beremin).

Más allá de la propia metodología de análisis del confinamiento, el procedimiento FITNET FFS pone en relación dicho análisis con dos cuestiones de gran trascendencia en el análisis a fractura: la Curva Maestra [5] y el efecto entalla:

El procedimiento FITNET incluye la formulación propuesta por Wallin para la evaluación del desplazamiento ocasionado por la pérdida de confinamiento en la Curva Maestra. La expresión de la Curva Maestra para situaciones de bajo confinamiento resulta ($T < 0$):

$$K_{mat}^c = 20 \text{ MPa} \sqrt{m} + (K_{mat} - 20) \exp(0.019[-T_{stress}/10 \text{ MPa}]) \quad (8)$$

De igual forma, la relajación tensional ocasionada por las entallas (con el consiguiente aumento de resistencia frente al caso fisurado) no ha sido incluida previamente en ningún procedimiento de fractura. El FITNET FFS, en su apartado 12.5, lo considera otra forma más de pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga (independiente de la anterior) y, haciendo uso de la metodología desarrollada en [6], propone la utilización de los modelos de la tensión media crítica [7] o de la mecánica de la fractura finita (MFF) [8] para la evaluación del incremento de tenacidad ocasionado por este tipo de defectos. En el caso del modelo de tensión media crítica, la resistencia a fractura modificada por efecto entalla sería:

$$K_{IN} = K_{IC} \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{ef}}} \quad (9)$$

Siendo ρ el radio de entalla y X_{ef} la distancia efectiva, definida en [7]. Una vez obtenido el valor de la tenacidad aparente los cálculos continúan de igual forma que en evaluaciones ordinarias.

En el caso de combinarse ambas fuentes de pérdida de confinamiento, el FAD modificado en el Procedimiento I resulta:

$$K_r = f(L_r) \cdot (1 + \alpha(-\beta L_r)^m) \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{ef}}} \quad L_r \leq L_{rmax} \quad (10)$$

4. ANÁLISIS DEL CONFINAMIENTO SEGÚN LA METODOLOGÍA IST

El proyecto japonés IST (*International Standardization of Fracture Toughness Evaluation Procedure for Fracture Assessment of Steel Structure*) se desarrolló entre los años 2002 y 2005 (simultáneamente al FITNET) con el objetivo de desarrollar un procedimiento de evaluación a fractura de componentes de acero a partir de los valores de tenacidad a fractura obtenidos de

probetas de laboratorio. Se basa en estudios preliminares (ej., [9]) en los cuales se correlaciona el CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) de las probetas normalizadas y de los componentes analizados a un mismo nivel de tensión de Weibull, σ_W .

El enfoque vuelve a ser, al igual que en el FITNET, de tipo biparamétrico, ya que usa un parámetro de fractura tradicional, el CTOD, y un segundo parámetro denominado “ratio equivalente del CTOD”, denominado β en dicho procedimiento y que, para evitar confundirle con el β del FITNET, aquí se va a denominar β_{IST} . De esta manera, el valor crítico del CTOD, δ_{cr} , obtenido en probetas normalizadas se transforma en un valor crítico de CTOD para el componente estructural (a la misma tensión de Weibull), $\delta_{WP,cr}$:

$$\delta_{WP,cr} = \delta_{cr} / \beta_{IST} \quad (11)$$

De esta manera, β_{IST} depende de la relación entre el límite elástico y la tensión de rotura, del parámetro de forma de Weibull (m), de la geometría de la fisura y, en menor medida más allá de los límites de la plasticidad a pequeña escala (*SSY, Small Scale Yielding*), del nivel de deformación alcanzado en el componente estructural.

El análisis a fractura según esta metodología consiste, en definitiva, en dividir por β_{IST} el valor de la tenacidad a fractura obtenida de ensayos normalizados sobre probetas con alto confinamiento. El valor de β_{IST} a utilizar se puede obtener según tres niveles de análisis diferentes, tanto menos conservadores cuanto mayor sea la información disponible:

- *Nivel I* (evaluación simplificada): se aplica a casos en los cuales no se dispone de la información necesaria para estimar β_{IST} . En tales casos se considera un valor por defecto de 0.5, lo cual es un valor tomado por defecto que asegura resultados conservadores.
- *Nivel II* (evaluación normal): se aplica en aquellos casos en los que se conocen las propiedades mecánicas del material y la geometría de la fisura, pero no se conoce el parámetro de forma de la tensión de Weibull, m . En este nivel de análisis, la metodología IST propone utilizar valores por defecto de m : 10 cuando δ_{cr} es inferior a 0.05 mm y 20 cuando es superior a 0.05 mm. Una vez determinado m , proporciona gráficas y formulación para determinar β_{IST} en una serie de geometrías (cuatro tipos diferentes de fisuras en chapas).
- *Nivel III* (evaluación específica): en este caso se determina el valor exacto de m de forma estadística a partir de una serie de resultados experimentales y se aplican las gráficas y la formulación

mencionadas para el Nivel II. Generalmente, este Nivel III de análisis proporciona menores valores de β_{IST} que el Nivel II.

Una vez determinado β_{IST} se obtiene directamente la resistencia a fractura del componente (ecuación (11)) y se pasa a realizar el análisis a fractura según la metodología elegida (ej. FAD).

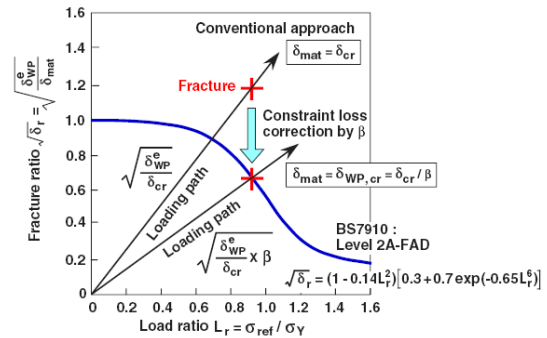


Figura 3. Análisis FAD aplicando la metodología IST [10].

5. VALORACIÓN CRÍTICA DEL FITNET FFS Y DE LA METODOLOGÍA IST

5.1. Valoración y aportaciones del FITNET FFS

En cuanto al FITNET FFS, cabe destacar las siguientes aportaciones:

- Proporciona una orientación acerca de la conveniencia o no de considerar el grado de confinamiento en el análisis, lo cual puede evitar importantes esfuerzos en el análisis que no proporcionan beneficio alguno en el resultado final.
- El análisis mediante la tensión T resulta muy sencillo. Una vez determinado β_T basta con conocer α y k para completar el análisis.
- Propone el uso de la mecánica de la fractura biparamétrica, igual que otros procedimientos, pero lo hace proporcionando una gran cantidad de datos en relación a los parámetros utilizados en el análisis (constantes del material, soluciones para la tensión T ...).
- Se puede aplicar a un gran número de geometrías.
- Puede aplicarse tanto a situaciones frágiles como a situaciones dúctiles.
- Es un método de evaluación del confinamiento muy versátil, ya que aunque describe el análisis en términos de Diagramas de Fallo, permite realizarlo también mediante Diagramas de Fuerza Motriz. De igual modo, pueden realizarse análisis de iniciación o de desgarro dúctil.
- El FITNET FFS incluye a la Curva Maestra como herramienta de análisis del confinamiento.
- Recoge la posibilidad de analizar entallas y fisuras que nacen en el fondo de una entalla. Se trata del primer procedimiento de evaluación de la

integridad estructural que contempla esta posibilidad.

- Finalmente, propone una metodología que permite analizar situaciones en las que se dan de forma simultánea las diferentes fuentes de pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga (defecto superficial tipo entalla sometido a cargas de tracción) [6]. De nuevo, el FITNET FFS es el primer procedimiento en recoger esta posibilidad.

Sin embargo, se pueden señalar una serie de cuestiones conceptuales que es necesario considerar al aplicar este procedimiento:

- Las soluciones numéricas de α y k se basan en un análisis de elementos finitos en 2D con condiciones de deformación plana y según un modelo MBL (*Modified Boundary Layer*).
- No considera el efecto del volumen en la tensión de Weibull, σ_w .
- En el caso de realizar el análisis según el parámetro Q , el valor del parámetro de confinamiento estructural, β_Q , varía con el nivel de carga aplicada, por lo que es necesario conocer su valor en rotura. Esto requiere un análisis adicional para determinar dicho valor.

5.2. Valoración y aportaciones de la metodología IST

Las principales aportaciones del procedimiento IST son las siguientes:

- Es un procedimiento de evaluación del confinamiento realmente sencillo, ya que consiste en afectar a la tenacidad a fractura obtenida en probetas normalizadas por un parámetro, β_{IST} , de muy sencilla obtención incluso en situaciones con muy pocos datos sobre el material.
- Presenta un procedimiento jerárquico en función de la información disponible, de manera que incluso cuando esta es muy limitada permite que el análisis a fractura se beneficie de la consideración de la pérdida de confinamiento tensional (Nivel I).
- En situaciones en las que se conocen las propiedades mecánicas del material propone un nivel intermedio de análisis (Nivel II) en el cual se ajusta más el resultado a la física del problema (con respecto al Nivel I) haciendo uso de dos valores de referencia para el parámetro m de Weibull en aceros (10 y 20).
- El parámetro β_{IST} se obtiene por comparación entre dos situaciones, la de la probeta normalizada y la del componente estructural, con idéntica tensión de Weibull. En este caso no se da el problema del efecto volumen que se ha indicado en el FITNET.
- Al igual que el FITNET FFS, permite análisis a fractura haciendo uso de Diagramas de Fallo.

Tal y como ocurría con el FITNET FFS, tiene una serie de limitaciones que es preciso comentar:

- Es un procedimiento desarrollado para análisis de fractura por clivaje, por lo que no considera la posibilidad de análisis de situaciones con propagación estable por desgarro dúctil [10].
- Siendo cierto que es un procedimiento de sencilla aplicación, lo es para un conjunto de geometrías muy limitado: CTCP, *Center Through-thickness Crack Panel*, CSCP, *Center Surface Crack Panel*, ESCP, *Edge Surface Crack Panel* y ETCP, *Edge Through-thickness Crack Panel*.
- Con respecto al FITNET FFS, no contempla el análisis de otro tipo de pérdidas de confinamiento en el plano de aplicación de la carga (efecto entalla), ni la interacción entre todas ellas. Tampoco pone en relación el análisis de confinamiento con la ZTDF del material (Curva Maestra).

5.3. Interrelaciones entre FITNET FFS e IST.

En este punto es posible determinar la relación existente entre la corrección por confinamiento del FITNET y la IST. Teniendo en cuenta la relación entre factor de intensidad de tensiones y CTOD (δ):

$$\delta = \frac{K_I^2}{1.5 \sigma_y \cdot E'} \quad (12)$$

El análisis FAD cuando se utiliza δ como parámetro de fractura resulta:

$$K_r = \sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{cr}}} = f(L_r) \quad (13)$$

Al incluir el confinamiento en este último análisis resultaría:

$$K_r = \sqrt{\delta_{r \text{ conf.}}} = \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{cr} / \beta_{IST}}} \quad (14)$$

Por lo que, finalmente:

$$K_r = \sqrt{\delta_{r \text{ conf.}}} = f(L_r) \cdot \sqrt{\beta_{IST}} \quad (15)$$

Y, en definitiva, la equivalencia entre las dos correcciones por confinamiento es:

$$(1 + \alpha(-\beta L_r)^m) \Leftrightarrow \sqrt{\beta_{IST}} \quad (16)$$

Es decir, para poder comparar en cada caso las correcciones propuestas por ambas metodologías habría que comparar los términos recogidos en la ecuación (16). A este respecto, cabe señalar que en el caso del FITNET la corrección por confinamiento depende del nivel de carga aplicado (a medida que aumenta la carga lo hace el efecto de

la pérdida de confinamiento), mientras que la corrección del IST es la misma para cualquier valor de carga aplicada (o lo que es lo mismo, para cualquier valor del parámetro L_r del FAD).

Por otra parte, el FITNET FFS podría tomar, en principio, los valores por defecto que propone la metodología IST para el parámetro m de Weibull en aceros, eliminando así una de sus mayores dificultades de aplicación. Esto convertiría, de hecho, al análisis FITNET de confinamiento en una metodología de análisis jerárquica con dos niveles de análisis: el primero, equivalente al Nivel II de la IST, en el cual se asumen los valores de m por defecto; el segundo, equivalente al Nivel III de análisis de la IST que requeriría una evaluación específica de m . El primer nivel de análisis del FITNET ya ha sido aplicado en [6].

6. CONCLUSIONES

Los procedimientos FITNET e IST de análisis del confinamiento constituyen una herramienta de análisis muy avanzada y permiten analizar la pérdida de confinamiento tensional en el fondo de una fisura.

Mientras el FITNET contempla la conveniencia o no de realizar análisis de este tipo, así como el análisis de un mayor número de geometrías de fisura (e incluso el análisis de otro tipo de defectos), la IST se centra en un número reducido de geometrías. Igualmente, el FITNET es aplicable a la fractura por clivaje y al desgarro dúctil, mientras que la IST solo está indicada para el análisis de fractura por clivaje. Más aún, el FITNET relaciona el análisis de confinamiento con la Curva Maestra del material en la ZTDF, con lo cual pone en relación dos problemas de primer orden en la mecánica de la fractura. De forma general, se puede decir que el FITNET recoge una trayectoria de investigación realizada en las últimas dos décadas que permite analizar mayor número de situaciones y encontrar a través de referencias (proporcionadas por el propio procedimiento) multitud de información sobre los *inputs* necesarios en el análisis.

Por otro lado, la IST presenta un procedimiento jerárquico capaz de aplicarse (en su primer nivel) sin apenas información de las propiedades mecánicas del material. Igualmente, la IST proporciona dos valores por defecto del parámetro m de Weibull (se elige uno u otro en función de la tenacidad del material) que resultan de gran utilidad y permiten realizar un análisis más avanzado que el del primer nivel.

Finalmente, se han establecido las interrelaciones entre ambas metodologías. Comenzando por el

hecho de que son dos metodologías biparamétricas, se ha determinado la equivalencia entre sus respectivas correcciones y se ha mostrado como los valores por defecto para el parámetro m de Weibull que propone la IST pueden tomarse como referencia en el FITNET, eliminando el principal problema de este procedimiento, que no es otro que la determinación del parámetro m de Weibull.

REFERENCIAS

- [1] Landes, J.D., McCabe, D.E., y Ernst, H.A., 1989, "Geometry effects on the R-curve, in non linear fracture mechanics: Volume 2 - Elastic Plastic Fracture" (eds J D Landes, A Saxena y J G Merkle) ASTM STP 905, pp. 123-143.
- [2] O'Dowd, N.P. y Shih, C.F., "Family of Crack-Tip Field Characterized by a Triaxiality Parameter-I. Structure of Fields". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 39, pp. 898-1015, 1991.
- [3] FITNET Fitness-for-Service (FFS) Proceure - Volume 1, Editors: M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, ISBN 978-3-940923-00-4, Printed by GKSS, Germany, 2008.
- [4] Sherry, A.H., et al., "Material Constraint Parameters for the Assessment of Shallow Defects in Structural Components- Part I: Parameter Solutions", Eng. Fract. Mech, Vol. 72 (15), pp. 2373-2395, 2005.
- [5] Wallin, K., "The scatter in KIC results", Eng. Fracture Mechanics, 19, pp. 1085-1093, 1984.
- [6] Cicero S, Gutiérrez-Solana F, Álvarez JA. "Structural integrity assessment of components subjected to low constraint conditions", Eng Fract Mech., Vol. 75, pp. 3038-3059, 2008.
- [7] Kim, J.H., Kim, D.H., y Moon, S.I., "Evaluation of static and dynamic fracture toughness using apparent fracture toughness of notched specimens", Materials Science and Engineering A, Vol. 387-389, pp. 381-384, 2004.
- [8] Taylor, D., Cornetti, P. y Pugno, N., "The fracture mechanics of finite crack extension", Eng Fracture Mechanics, 72, pp. 1021-1038, 2005.
- [9] Minami F., et al., "Equivalent CTOD concept for fracture toughness requirement of materials for steel structures", Proceedings of OMAE 18, St. John's, OMAE99/MAT-2130, 1999.
- [10] Minami F et al., "Method of constraint loss correction of CTOD fracture toughness for fracture assessment of steel components", Eng. Fract Mech, Vol. 73(14), pp. 1996-2020, 2006.