

EL SINTAP COMO PROCEDIMIENTO JERARQUIZADO DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL CON COMPATIBILIDAD ENTRE DISTINTOS MÉTODOS**F. Gutiérrez-Solana y J. Ruiz Ocejo****Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de los Castros s/n, 39005 Santander**

Resumen. Cuando se trata de desarrollar y redactar un Procedimiento de Evaluación Estructural es importante establecer diferentes niveles de evaluación en función de los posibles datos de entrada conocidos por el usuario. La definición de las ecuaciones de los distintos niveles de evaluación resulta complicada y comprometedor, ya que los niveles más básicos deben otorgar resultados más conservadores que los avanzados. Resulta, pues, de especial importancia el establecimiento de una jerarquía entre los distintos niveles, así, cuanto mejores y más profundos sean los datos conocidos por el usuario, menos conservadora será la evaluación estructural.

Este artículo describe brevemente las características del Proyecto SINTAP como un procedimiento jerárquico y ordenado así como integrador de las dos corrientes metodológicas habituales en la actualidad, Diagramas de Evaluación de Fallo y Diagramas de Fuerza Motriz de Fisuración. En este trabajo se definen las hipótesis y las operaciones necesarias para demostrar su total compatibilidad.

Abstract. When developing and writing a Structural Assessment Procedure, it is important to establish different assessment levels as a function of the possible input data known by the user. The definition of the equations for the different levels is complicated and compromising because the simplest levels should produce more conservative results than those for the most advanced. So, the establishment of a hierarchy between the levels results definitive, thus, the better and deeper the input data known, the less conservative the structural evaluation.

This paper describes the main characteristics of SINTAP Project as a structured and ordered procedure as well as integrating the two existing methodologies used nowadays, Failure Assessment Diagrams and Crack Driving Force Diagrams. This work defines the hypothesis and analytical steps needed to show their full compatibility.

1. INTRODUCCIÓN

Los procedimientos de evaluación de la integridad estructural son un conjunto de técnicas utilizadas para garantizar la "idoneidad para el servicio" de componentes o estructuras bajo sus condiciones de solicitación. Estos procedimientos son necesarios tanto en el diseño como en el análisis en estado operativo, al proporcionar mejoras en parámetros tales como seguridad, costo, calidad de servicio y competitividad.

Esta necesidad ha motivado la existencia de un gran número de procedimientos en creciente uso, cuyas similitudes y diferencias han sido exhaustivamente revisadas [1-4]. Sin embargo la falta de uniformidad en la metodología que con que estos procedimientos abordan el análisis estructural conduce a incertidumbres en lo referente a las condiciones de seguridad que ofrecen cada uno de ellos.

La diversidad metodológica se refiere, por una parte, al uso de dos tipos de aproximación al análisis de

seguridad estructural, los Diagramas de Evaluación de Fallo (failure assessment diagrams, FADs) o los Diagramas de Fuerza Motriz de Fisuración (crack driving force diagrams, CDFDs), y, por otro, a los niveles de información, o simplificación, del comportamiento del material del componente (resistencia mecánica y tenacidad), del estado de solicitaciones sobre el mismo y de las condiciones geométricas de sus defectos y su evolución.

La diversidad mostrada y la incertidumbre que ofrecen los resultados alcanzados en cada caso ponen en evidencia la necesidad de unificar estos procedimientos en uno solo, válido para estructuras y componentes de todo tipo de industrias, que posibilite su normalización. Esta necesidad ha sido el motivo de trabajo del proyecto SINTAP, con dos características fundamentales: la compatibilidad de las dos líneas metodológicas (FADs y CDFDs) y la jerarquización del análisis en función de la precisión de los parámetros que caracterizan el comportamiento resistente de los materiales que componen la estructura en análisis.

2. LA COMPATIBILIDAD ENTRE LOS ANÁLISIS POR FAD Y CDFD

Los Diagramas de Evaluación de Fallo se basan en el uso de una representación gráfica en la que se conjugan dos variables adimensionales L_r y K_r [5]. Estas dos variables son la razón entre el valor de sollicitación aplicado, tensión y factor de intensidad de tensiones respectivamente, dividido por los correspondientes parámetros de resistencia, límite elástico y tenacidad a fractura. Una vez definido el punto de análisis en el plano de representación, cada método define una curva que establece la zonas de seguridad y fallo. La zona de seguridad está delimitada por la mencionada curva y los ejes.

La mayoría de procedimientos basados en el diagrama de análisis de fallo definen curvas de condición crítica que se corresponden con diferentes simplificaciones. Estas curvas permiten al usuario desarrollar varios niveles de análisis en función de los datos de entrada disponibles.

Los Diagramas de Fuerza Motriz de Fisuración (CDFD) se basan en la comparación directa entre los parámetros aplicados, en términos tanto de COD como de la integral-J, que caracterizan el estado de tensiones y deformaciones en el fondo de las fisuras del componente en análisis, y las características resistentes del material a la fisuración en los mismos términos, valores críticos de los parámetros COD o J. A pesar de la ventaja que esta metodología plantea por su directa interpretación física, las dificultades que se tienen en determinar los valores de J o COD aplicados han evitado su uso mayoritario. Las aproximaciones del método ETM [6], al basar las soluciones aplicadas en los conocidos valores del factor de intensidad de tensiones, permiten mejorar las expectativas de su aplicación extensiva.

A pesar de las diferencias que existen entre estas líneas metodológicas ambas parten de una fuente común, la comparación entre sollicitación y la resistencia del material a escala local, y no es sino su desarrollo, siguiendo diferentes simplificaciones, lo que las separa. Por ello, para garantizar el empleo de cada una de ellas cuando el usuario potencial lo considere más apropiado, el procedimiento SINTAP establece las dos vías de análisis tras demostrarse su compatibilidad.

En efecto, debe considerarse inicialmente que cualquier FAD lo que establece es una línea que delimita las condiciones de seguridad estructural de las de inseguridad, por la relación

$$K_r^{\text{LINE}} = f(L_r) \quad (1)$$

y que esta línea es una simplificación de su verdadera definición [7]

$$K_r^{\text{LINE}} = \left(\frac{J_e}{J} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Cuanto mejor se ajuste la ecuación (1) a la (2), más aproximado serán las evaluaciones hechas con ella, y también más aproximada será la relación

$$\left(\frac{J_e}{J} \right)^{1/2} \approx f(L_r) \quad (3)$$

de la que se obtiene

$$J = J_e \cdot [f(L_r)]^2 \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que

$$J_e = \frac{K_t^2}{E'} \quad (5)$$

se obtiene una expresión de la integral-J aplicada dada por

$$J = \frac{K_t^2}{E'} \cdot [f(L_r)]^2 \quad (6)$$

que se basa en el conocimiento del factor de intensidad de tensiones K_t del componente bajo la sollicitación dada y la ecuación (1) de la línea de fallo.

Análogamente conocida la solución de la J aplicada para una sollicitación F dada sobre un componente, como puede ser según el procedimiento ETM [6]

$$\frac{J}{J_Y} = \left(\frac{F}{F_Y} \right)^{\frac{1+N}{N}} \quad (7)$$

en la que J_Y es el valor de J aplicada para el límite elástico, N el coeficiente de endurecimiento del material y F_Y el nivel de sollicitación para el que se inicia el proceso plástico, en vez de utilizarse siguiendo la metodología CDF, puede considerarse que:

$$\frac{F}{F_Y} = L_r \quad (8)$$

y como

$$K_r^{\text{LINE}} = \left(\frac{J}{J} \right)^{1/2} = \left(\frac{K_t^2}{E' J} \right)^{1/2} \quad (9)$$

se obtiene la relación

$$K_r^{\text{LINE}} = \left(\frac{K_t^2}{E' J_Y} \right)^{1/2} \cdot L_r^{\frac{1+N}{2N}} \quad (10)$$

que define el valor de la línea de fallo (1) para $L_r \geq 1$. Para tener la línea completa a partir de una línea definida en la zona de comportamiento elástico, para $L_r \leq 1$, se debe cumplir la condición de continuidad en $L_r = 1$, en que $J=J_Y$ y $K=K_Y$, es decir:

$$K_{r(L_r=1)} = \left(\frac{K_Y^2}{E' J_Y} \right)^{1/2} \tag{11}$$

y por tanto

$$J_Y = \frac{K_Y^2}{E (K_{r(L_r=1)})^2} \tag{12}$$

Así que se llega a la expresión genérica

$$K_r^{LINE} = K_{r(L_r=1)} \frac{K_Y}{K_Y} L_r^{\frac{1+N}{2N}} = K_{r(L_r=1)} L_r^{\frac{N-1}{2N}} \tag{13}$$

que representa la línea de fallo de un FAD a realizar en lugar del correspondiente análisis por CDF siguiendo la ecuación (7).

Así pues existe compatibilidad total entre ambas metodologías y de acuerdo con ello el procedimiento SINTAP recoge ambas [8], partiendo de una jerarquizada definición, según la calidad de los datos de las resistencias mecánicas y a la fisuración del material disponible, de las líneas de fallo (1) para un análisis de tipo FAD, y proponiendo como alternativa la ecuación (6) correspondiente, lo que establece una jerarquización equivalente para un análisis tipo CDF. Esta compatibilidad ha sido contrastada con diferentes ejemplos analíticos en base a patrones de referencia experimentales [9].

3. LA JERARQUIZACIÓN DEL ANÁLISIS

El procedimiento SINTAP permite realizar un análisis de evaluación estructural bajo el conocimiento de las condiciones de sollicitación, los valores de K_I o J aplicados correspondientes, el conocimiento de la tenacidad del material, ya sea directo u obtenido de forma indirecta a través de ensayos de resiliencia, y la definición de unas líneas de fallo (1) jerarquizadas en orden creciente, es decir más próximas a su valor (2), conforme se aplica en su definición un conocimiento más preciso del comportamiento mecánico del material del componente definido por un ensayo de tracción.

Existe un nivel de análisis de referencia, nivel 0, por defecto, que define, a semejanza de como lo hace el procedimiento R6 [10] una línea de fallo como envolvente conservadora de todas las analizadas, tanto para materiales con endurecimiento continuo como con plataforma de cedencia para σ_Y (límite elástico). Las expresiones son respectivamente:

$$K_r = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \tag{14}$$

$$\begin{cases} K_r = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} & \text{para } L_r \leq 1 \\ K_r = 0 & \text{para } L_r > 1 \end{cases} \tag{15}$$

El término $[1+L_r^2/2]^{-1/2}$ presente tiene como sentido físico el que representa la línea correspondiente a un material de comportamiento elástico lineal perfecto. El segundo factor de la ecuación (14) significa la pérdida de zona de seguridad que establece un material en la zona elástica cuando abandona la linealidad, todo ello más acusado en las proximidades de $L_r = 1$ (o del límite elástico). La Figura 1 muestra el efecto de este abandono del comportamiento elástico lineal.

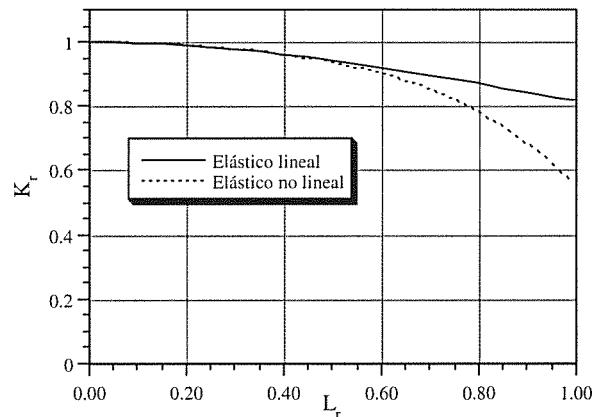


Figura 1. Efecto del abandono de la elasticidad lineal en la línea de fallo.

Para la definición de este factor que afecta sólo a la región elástica se hizo un estudio [11] de los diferentes valores de un parámetro de correlación μ para distintos materiales en función de su relación σ_Y/E . La Figura 2 estima los valores de μ que aproximan por el lado conservador la línea de fallo, según la expresión (14), a la real.

Finalmente el procedimiento establece como valor de μ el mínimo valor entre 0.6 (su máximo) y el dado por

$$\mu = 0.001 \frac{E}{\sigma_Y} \tag{16}$$

que equivale a la hipérbola

$$\mu \cdot \frac{\sigma_Y}{E} \cdot 10^3 = 1 \tag{17}$$

dibujada como límite de seguridad en la propia Figura 2.

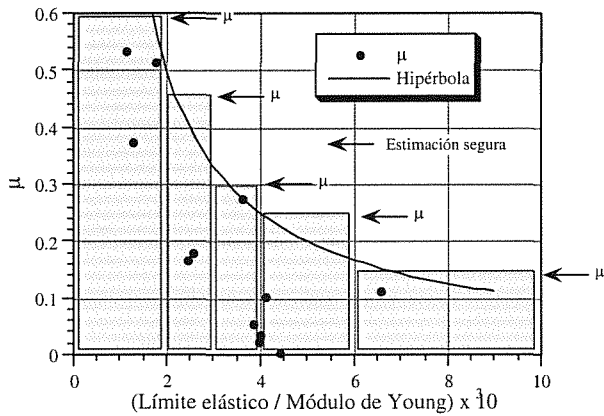


Figura 2. Resultados de μ [11].

Sin embargo este nivel de referencia no es considerado por el SINTAP salvo para casos excepcionales, sugiriéndose que el análisis más básico se haga para el nivel 1, conocidos σ_Y y la tensión de rotura del material. Tanto para materiales de endurecimiento continuado como con escalón de cedencia, la línea de fallo viene dada para $L_r \leq 1$ por las correspondientes ecuaciones del nivel cero (14) y (15).

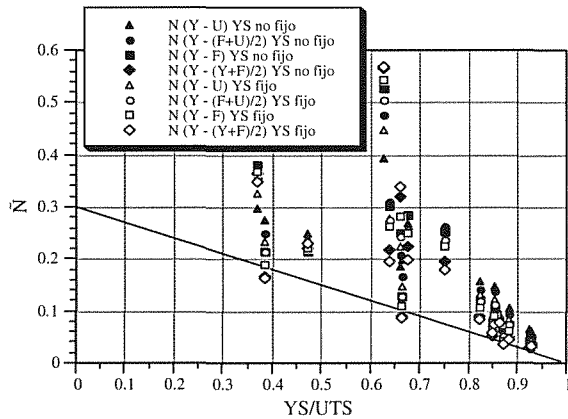


Figura 3. Resultados de N [13].

Para los materiales con endurecimiento continuado se plantea una ecuación para la línea de fallo en el rango $L_r \geq 1$ dada por:

$$K_r = K_{r(L_r=1)} L_r^{\frac{N-1}{2N}} \quad (18)$$

en la que N se estima mediante \tilde{N} , un parámetro definido a través de la relación

$$\tilde{N} = 0.3 \left(1 - \frac{YS}{UTS} \right) \quad (19)$$

obtenido como la envolvente que deja del lado de la seguridad ($\tilde{N} < N$) la correspondiente línea de fallo comparada con la real del material, una vez estudiados 19 materiales diferentes, mayoritariamente aceros, [12, 13], como se muestra en la Figura 3. Debe considerarse que en la ecuación 18 cuanto menores sean los valores

de N , éstos proporcionan una limitación mayor a la zona de evaluación segura, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.

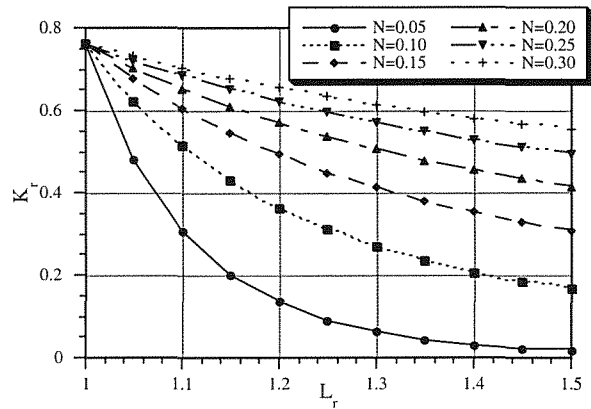


Figura 4. Líneas de fallo ($L_r > 1$) para distintos N .

Para materiales con escalón de cedencia, la línea de fallo presenta un escalón vertical para $L_r = 1$, que aporta un valor mínimo para K_r ($L_r = 1$) dado por:

$$\min K_{r(L_r=1)} = \left[\lambda_{\max} + \frac{1}{2\lambda_{\max}} \right]^{-1/2} \quad (20)$$

En esta expresión λ_{\max} es

$$\lambda_{\max} = 1 + \frac{E}{\sigma_Y} \Delta_\epsilon \quad (21)$$

siendo Δ_ϵ la extensión en deformaciones del escalón de cedencia, estimada por la relación

$$\Delta_\epsilon = 0.0375 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{1000} \right) \quad (22)$$

cundo σ_Y se mide en MPa, deducida de un estudio [14] sobre diferentes materiales como envolvente máxima de los valores del escalón de cedencia en función del límite elástico de cada uno de ellos. La envolvente máxima de Δ_ϵ define los mayores valores de λ_{\max} , y consecuentemente los mínimos de K_r con lo que la línea de fallo establece condiciones de análisis conservadoras.

La línea de fallo para estos materiales con escalón de cedencia para $L_r > 1$ queda dada por la ecuación

$$K_r = \left[\lambda_{\max} L_r^{\frac{1}{N}-1} + \frac{L_r^{\frac{3}{N}-1}}{2\lambda_{\max}} \right]^{-1/2} \quad (23)$$

La Figura 5 muestra la línea de fallo para un acero ferrítico con escalón de cedencia siguiendo las ecuaciones correspondientes (15), (20) y (23) para sus diferentes zonas.

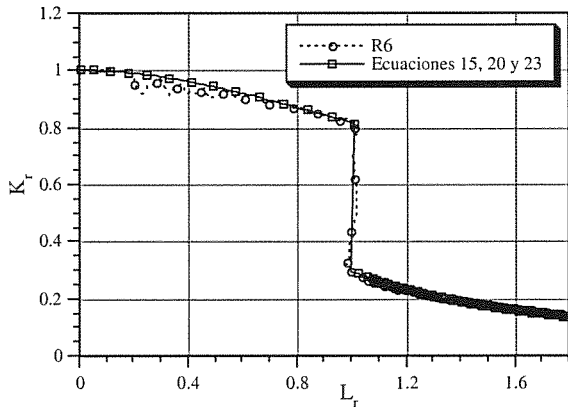


Figura 5. Comparación entre líneas de fallo para un acero ferrítico.

El segundo nivel del procedimiento SINTAP, nivel 2, es semejante al primero pero dedicado a las zonas de unión en componentes con soldaduras disimilares (mis-match) en las que los límites elásticos de soldadura y material base difieren en más del 10%. La mayor complejidad de la formulación no aporta novedades a los criterios de jerarquización hasta aquí presentados.

Así el segundo escalón jerárquico contemplado por el procedimiento, al que se debe acudir en estudios de evaluación que hayan dado resultados negativos en el primer nivel, corresponde a su nivel 3, cuyas líneas de fallo son obtenidas a partir del conocimiento completo de la caracterización a tracción del material del componente, es decir, su curva tensión-deformación completa en coordenadas verdaderas.

La definición de la línea de fallo viene dada por [10]:

$$K_r = \left[\frac{E\epsilon_{ref}}{L_r \sigma_y} + \frac{L_r^3 \sigma_y}{2E\epsilon_{ref}} \right]^{-1/2} = \left[\frac{E\epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{2E\epsilon_{ref}} \right]^{-1/2} \quad (24)$$

De esta manera el procedimiento ofrece una jerarquización en el análisis pasando de ecuaciones de menos a más precisas de acuerdo con el nivel de conocimiento del comportamiento mecánico del material de los componentes a evaluar según se resume en la Figura 6. Esta jerarquización se extiende al análisis que sigue la metodología del CDFD, a través de la compatibilidad mostrada en el apartado anterior.

La Figura 7 muestra, para un material, los niveles de línea de fallo establecidos, el básico o cero y los dos recomendados por el SINTAP, niveles 1 y 3.

En ella se puede apreciar la pérdida de conservadurismo conforme el nivel jerárquico avanza, manifestado al ir conteniendo las zonas seguras de los niveles más altos a las de los niveles más bajos.

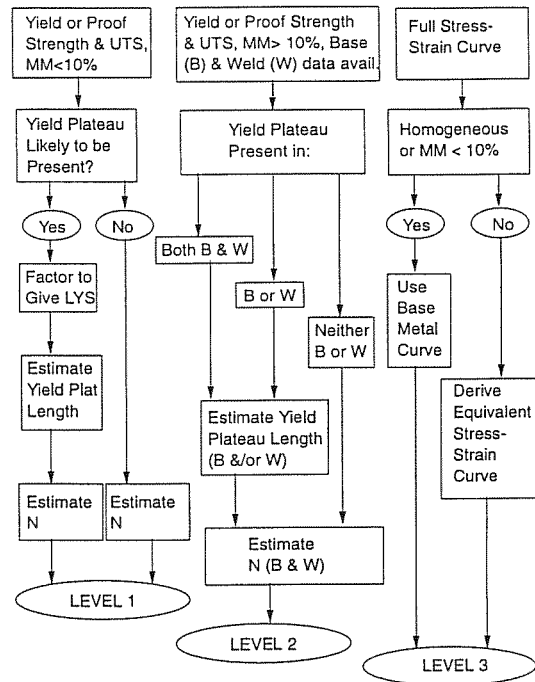


Figura 6. Diagrama de flujo, resumen de alternativas [15].

Por otro lado, el conservadurismo del análisis también es función de la precisión existente en el comportamiento en fractura del material. En este sentido el procedimiento contempla diferentes niveles de aproximación, tanto para las condiciones de iniciación, definiendo la tenacidad del material a través del proceso estadístico MML (maximum likelihood) y de la curva maestra [15] aplicado a resultados de caracterización de la tenacidad o de la resiliencia del material, como de desgarro, a través de las curvas R de resistencia a la fisuración propias del material.

De esta manera el avance en la precisión del análisis presenta dos posibles vías de acción, aquella relativa a la modificación de la línea de fallo, ampliando la zona de seguridad con el mejor conocimiento de las propiedades mecánicas (niveles de línea de fallo crecientes), y aquella relativa a la aproximación de los valores de tenacidad a los verdaderos, siempre en orden creciente, al basarse en datos más próximos a las condiciones de funcionamiento.

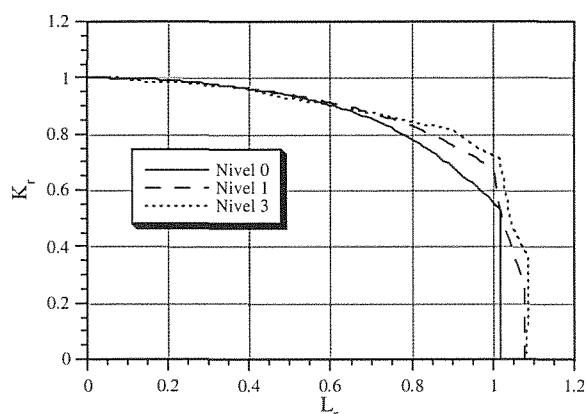


Figura 7. Distintas líneas de fallo para un mismo material.

4. EPÍLOGO

A través de esta presentación se ha puesto en evidencia que el procedimiento de evaluación de la integridad estructural de componentes SINTAP, nacido con vocación de unificar la dispersa oferta que el usuario puede encontrar a la hora de aplicar procedimientos de este tipo, presenta dos características intrínsecas:

- La compatibilidad en su seno de las dos grandes líneas de aplicación metodológica de estos procedimientos: la basada en los FAD y la basada en los diagramas CDF.
- La jerarquización en su análisis que permite ir mejorando la fiabilidad del mismo conforme se aplica un mejor conocimiento del comportamiento mecánico a tracción del material de los componentes y de la caracterización de la tenacidad del mismo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido llevado a cabo dentro del proyecto SINTAP financiado por la Unión Europea, cuyos objetivos se enmarcan dentro del programa BRITE-EURAM III.

6. REFERENCIAS

- [1] Milne I., "Component Assessment: Fracture Mechanics for Added Value", Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications, ESIS/EGF 9 (Edited by J.G. Blauel and K.-H. Schwalbe), Mechanical Engineering Publications, London, pp. 943-955, 1991.
- [2] Gorrochategui I., "Comportamiento en rotura de tuberías de alta tenacidad con sustentación hiperestática en régimen elastoplástico", 1993, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- [3] Ruiz Ocejo J., González-Posada M.A., Gorrochategui I. y Gutiérrez-Solana F., "Presente y Futuro de los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Fisurados", Anales de Mecánica de la Fractura, 14, pp. 417-420, 1997.
- [4] Ruiz Ocejo J., González-Posada M.A., Gutiérrez-Solana F. and Gorrochategui I., "Development and Validation of Procedures: Review of Existing Procedures", SINTAP Task 5, Report SINTAP/UC/04, 1997.
- [5] Harrison R.P., Loosemore K. and Milne I., "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", CEBG Report R/H/R6, 1976.
- [6] Schwalbe K.-H., Zerbst U., Kim Y.-J., Brocks W., Cornec A., Heerens J. and Amstutz H., "The Engineering Treatment Model for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures, comprising the versions ETM 97/1 and ETM 97/2 (EFAM ETM 97)", GKSS-Forschungszentrum, GKSS 98/E/6, 1998.
- [7] Anderson T.L. "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications", Second Edition, 1995.
- [8] Ruiz Ocejo J., Gutiérrez-Solana F., González-Posada M.A. and Gorrochategui I., "Failure Assessment Diagram-Crack Driving Force Diagram Compatibility", Report SINTAP/UC/05, November 1997.
- [9] Ainsworth R.A., Kim Y.-J., Zerbst U, Gutiérrez-Solana F. and Ruiz Ocejo J., "Driving Force and Failure Assessment Diagram Methods for Defect Assessment", OMAE Conference, Lisbon, July 1998.
- [10] Milne I., Ainsworth R.A., Dowling A.R. and Stewart A.T., "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", CEBG Report R/H/R6-Rev.3, 1987.
- [11] Ruiz Ocejo J., Gutiérrez-Solana F. and González-Posada M.A., Report SINTAP/UC/06, February 1998.
- [12] Ruiz Ocejo J. and Gutiérrez-Solana F., "On the Strain Hardening Exponent Definition and its influence within SINTAP", Report SINTAP/UC/07, April 1998.
- [13] Ruiz Ocejo J. and Gutiérrez-Solana F., Report SINTAP/UC/08, June 1998.
- [14] Bannister A.C., "Recommendations from Y/T Working Group for SINTAP Procedure", Document SINTAP/BS/23, June 1998.
- [15] SINTAP Procedure Revision 5.0 (Draft), January 1999.