

FITNET FFS PROCEDURE: UN PROCEDIMIENTO EUROPEO UNIFICADO DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

F. Gutiérrez-Solana, S. Cicero

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

E-mail: gsolana@unican.es

RESUMEN

El recientemente finalizado *European Fitness for Service Network* ha desarrollado un procedimiento europeo unificado de evaluación de la integridad estructural denominado *FITNET Fitness for Service Procedure* que comprende el análisis de componentes y estructuras frente a los cuatro principales modos de fallo: fractura-colapso plástico, fatiga, fluencia y corrosión. Este procedimiento ha sido remitido al Comité Europeo de Normalización (CEN) para su adopción futura como norma europea de integridad estructural.

En este trabajo se recogen los orígenes y la razón de ser del procedimiento, el contenido del mismo, su estructura en los capítulos específicos de cada modo de fallo, la información recogida en los diferentes anexos y todas aquellas novedades que aporta como procedimiento de evaluación. El objetivo es mostrar una visión clara, global y completa del documento que permita apreciar todo su potencial de evaluación y sus diferentes aplicaciones a la ingeniería.

ABSTRACT

The recently finished *European Fitness for Service Network* has developed a unified European procedure for the structural integrity assessment called *FITNET Fitness for Service Procedure*, which covers the analysis of components and structures under the four main failure mechanisms: fracture-plastic collapse, fatigue, creep and corrosion. This procedure has been submitted to the European Committee for Standardization (CEN) for its adoption as a European Standard for structural integrity.

This paper gathers the origins and the reason for being of the *FITNET FFS Procedure*, its content, its structure on the specific chapters dedicated to the different failure mechanisms, the information gathered on the annexes and all those novelties that offers as an assessment procedure. The objective is to show a clear, global and complete view of the document that allows appreciating all its potential as an assessment tool and its different applications to engineering.

PALABRAS CLAVE: FITNET, Integridad estructural.

1. INTRODUCCIÓN

En los comienzos del nuevo milenio la situación europea con respecto a la integridad estructural era confusa y desordenada. Existían numerosos procedimientos de evaluación de carácter marcadamente nacional como la BS7910 británica [1] o el RCC-MR francés [2] y otros cuya aplicación quedaba restringida a una industria concreta, como el R5 [3] y el R6 [4] de *British Energy* y el SAQ sueco [5] en el sector nuclear. Además, cada uno de estos procedimientos se centra generalmente en un tipo de fallo específico (R5 en la fluencia, BS7910, R6 y SAQ en la fractura...), sin que hubiese un procedimiento que permitiese evaluar un componente frente a los distintos mecanismos de fallo. El Procedimiento SINTAP [6], desarrollado entre 1996 y 1999 ordenó la situación en el terreno de la fractura, unificando criterios y resolviendo la tradicional dicotomía entre el uso de Diagramas de Fallo (FAD) y Diagramas de Fuerza Motriz de Agrietamiento (CDFD), demostrando la completa equivalencia entre las dos vías.

Por otra parte, otras potencias industriales como Estados Unidos y Japón disponían de procedimientos propios que cubrían el análisis de los distintos modos de fallo y ofrecían un panorama más sencillo y definido. Así, procedimientos americanos como el API 579 [7] en el sector petrolífero y el ASME XI [8] en la industria nuclear o el procedimiento JSME japonés [9] estaban plenamente definidos y su uso estaba ampliamente extendido en la industria.

Este panorama, caracterizado por la falta de uniformidad, la excesiva variedad, la falta de visión global y el retraso existente con respecto a otros países, hacía absolutamente necesario el desarrollo de un procedimiento europeo unificado que cubriese los principales modos de fallo y que ofreciese a la industria europea una herramienta con la que diseñar, fabricar y gestionar los componentes e instalaciones industriales de una forma más segura y eficiente.

Con este propósito se ha desarrollado, al amparo del V Programa Marco, desde febrero de 2002 hasta mayo de

2006 el *European Fitness for Service Network* [10], cuyo producto final es el *FITNET FFS Procedure* [11], un documento que recoge un procedimiento de evaluación de la integridad estructural frente a los cuatro principales modos de fallo: fractura-colapso plástico, fatiga, fluencia o creep y corrosión. La organización matricial del proyecto se muestra en la Figura 1, en la que se pueden apreciar las organizaciones implicadas y los líderes de cada uno de los *Working Groups* (WGs

liderados por grandes empresas industriales y asociados a cada uno de los tipos de fallo analizados) y *Work Packages* (WPs liderados por centros de investigación y universidades y asociados a tareas de apoyo específicas). El documento finalmente obtenido ha sido enviado al Comité Europeo de Normalización (CEN) con el objetivo de comenzar el camino que le convierta en la futura norma europea de evaluación de la integridad estructural de componentes y estructuras.

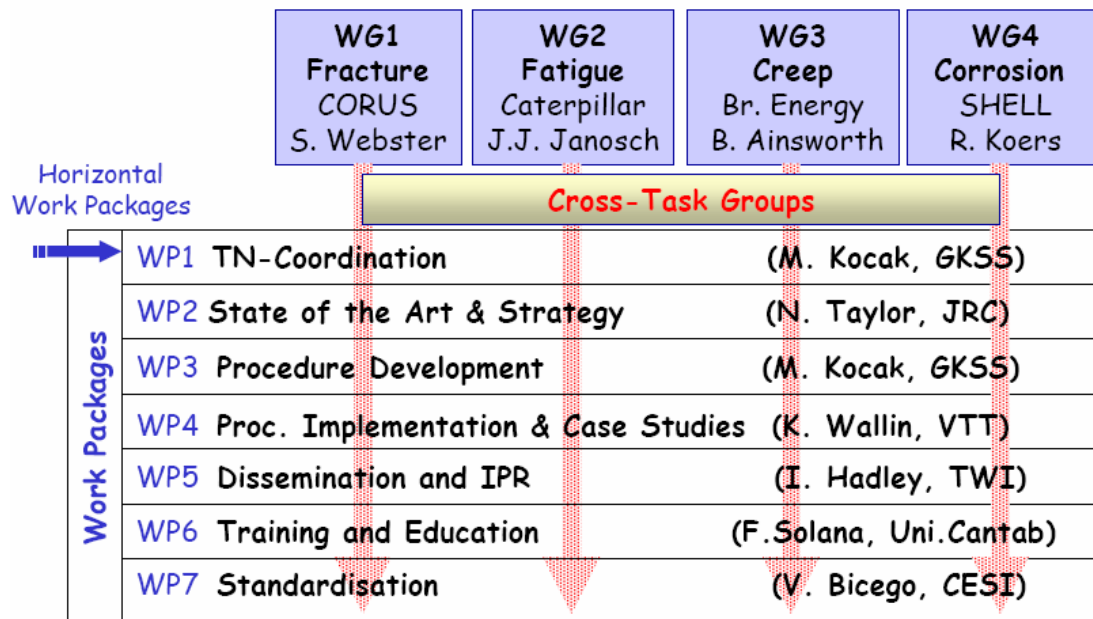


Figura 1. Estructura de trabajo del European Fitness for Service Network.

2. EL PROCEDIMIENTO FITNET FFS

El procedimiento está organizado en tres volúmenes:

- *Volume I: FITNET FFS Procedure.* Recoge el propio procedimiento de evaluación, con capítulos dedicados a cada tipo de fallo denominados módulos y con otros en los que se recogen metodologías y técnicas de evaluación específicas que recogen los últimos avances científicos y tecnológicos en el campo de la integridad estructural (análisis de confinamiento, *Leak Before Break*, *Master Curve*, *Crack Arrest*, Modo Mixto, tratamiento de entallas...)
- *Volume II: CASE STUDIES AND TUTORIALS.* En este documento se recogen numerosos casos de aplicación del procedimiento a problemas industriales y un total de doce ejemplos en los que se aplica, paso a paso, el FITNET FFS a distintos problemas de fractura, fatiga, fluencia, corrosión y combinaciones de los mismos.

- *Volume III: ANNEX.* Este tomo, que sirve de apoyo a la aplicación del procedimiento, lo componen un total de once anexos que recogen soluciones de expresiones de factores de intensidad de tensiones y cargas de colapso plástico para un amplio número de geometrías, perfiles de tensiones residuales, caracterización geométrica de defectos, valores de parámetros de confinamiento...

A su vez, se ha desarrollado un *Training Package* [12] en el que se recogen desde los conceptos teóricos básicos de la mecánica de la fractura hasta la aplicación de los distintos módulos del Procedimiento.

3. LOS MÓDULOS DEL PROCEDIMIENTO

La parte fundamental del Procedimiento lo constituyen los capítulos 6 a 9 que se corresponden, respectivamente, con los Módulos de Fractura, Fatiga, Fluencia (*Creep*) y Corrosión. A continuación se presentan las características principales de cada uno de ellos.

3.1. Módulo de Fractura

El Módulo de Fractura del procedimiento FITNET (Capítulo 6) se basa en el procedimiento SINTAP y recoge los avances producidos en el campo de la integridad estructural desde la publicación de éste [13]. Se basa en los principios de la Mecánica de la Fractura y es aplicable a la evaluación de estructuras metálicas (soldadas o no soldadas) que contienen fisuras reales o postuladas [11]. Está diseñado para su aplicación durante el diseño, la fabricación, la evaluación en servicio de componentes y el diagnóstico de fallos producidos.

El análisis a fractura está gobernado por los tres parámetros:

- Resistencia a fractura del material
- Geometría del componente y del defecto
- Las cargas aplicadas

que propician la evaluación de la integridad del componente en base a la metodología recogida en el flujograma de trabajo que se reproduce en la Figura 2.

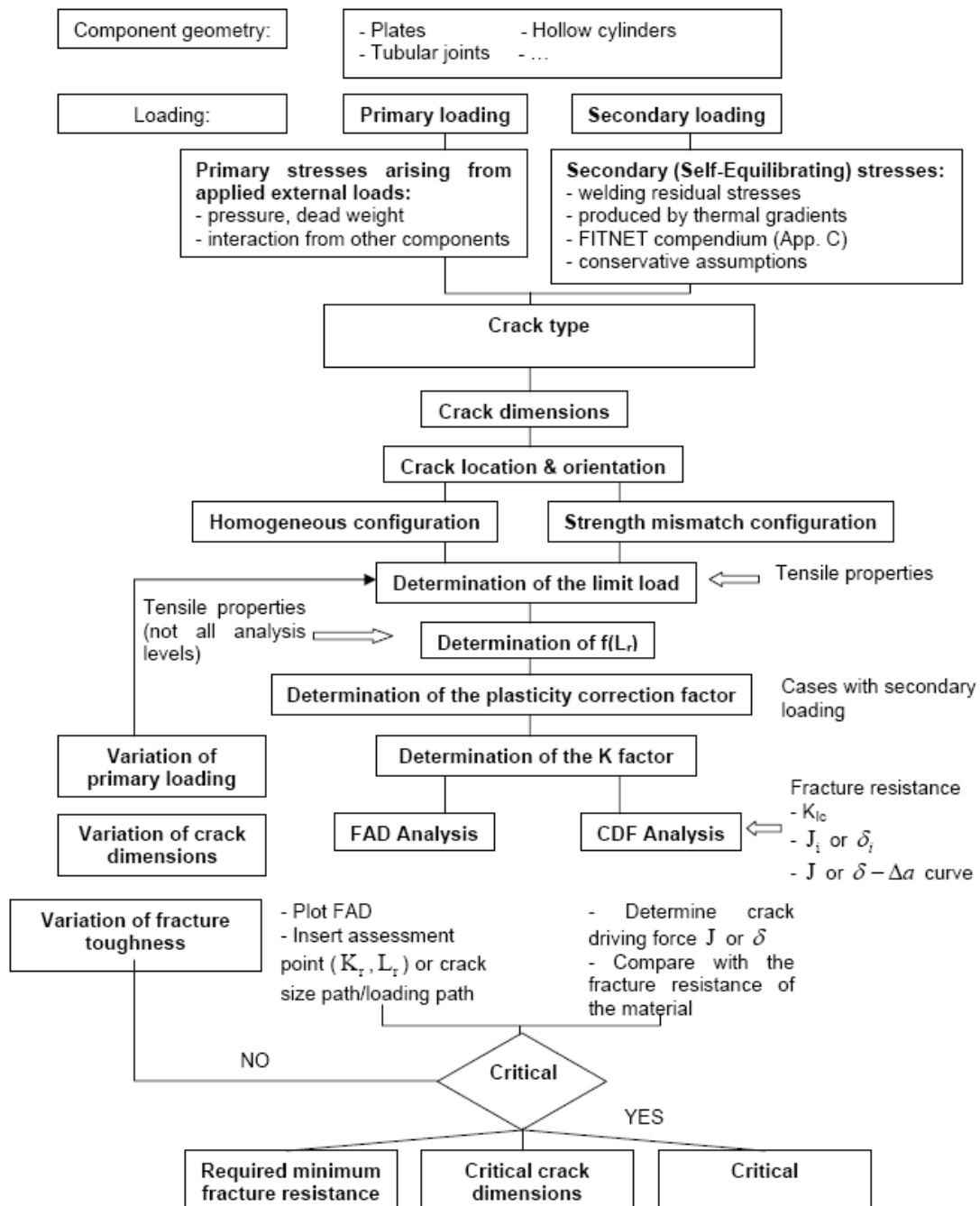


Figura 2. Flujograma del Módulo de Fractura [11].

El Procedimiento plantea la posibilidad de realizar el análisis por la metodología FAD (*Failure Assessment Diagram*) y por la metodología CDFD (*Crack Driving Force Diagram*), obteniéndose resultados idénticos por ambas vías tal y como quedó demostrado en el SINTAP [14,15]. A su vez, también ofrece la posibilidad de realizar un análisis de iniciación o bien un análisis de desgarro.

El FITNET, al igual que el SINTAP, es un procedimiento jerárquico en el que se puede ir refinando el análisis a medida que aumenta la información sobre las propiedades mecánicas del material [6,16,17] siguiendo las directrices recogidas en la Figura 3 [6,11]. Así, distingue seis opciones (*Options*) asociadas a otras tantas situaciones de conocimiento del material, tal y como se muestra en la Figura 4.

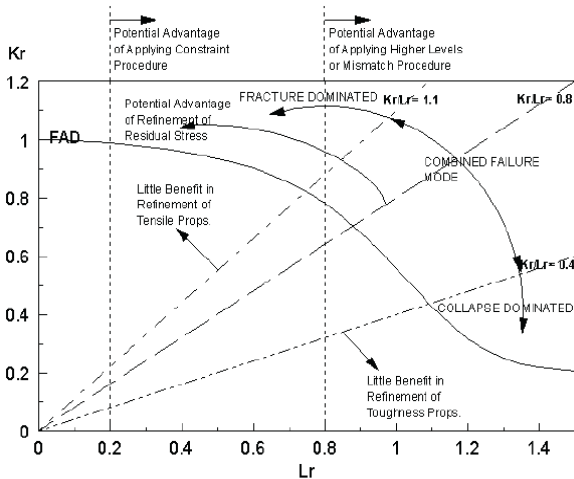


Figura 3. Regiones del FAD para la consideración del refinamiento de los parámetros resistentes del material [6,11].

Los análisis correspondientes a las Opciones 0 a 3 llevan asociados cierto grado de conservadurismo. Parte del mismo es debido a la subestimación de la resistencia a fractura del material ocasionada por el uso de valores de tenacidad a fractura obtenidos de probetas con fisuras profundas y sometidas a cargas flectoras. Estas condiciones garantizan un grado de triaxialidad tensional (confinamiento) muy elevado en el fondo de fisura. En la situación analizada la fisura puede no ser profunda y/o las cargas aplicadas pueden ser predominantemente de tracción, dando lugar a una reducción del confinamiento y al desarrollo de una mayor resistencia del componente frente a la fractura. La Opción 5 del FITNET FFS permite tener en cuenta este fenómeno.

OPTION	DATA NEEDED	WHEN TO USE
BASIC OPTION		
OPTION 0 Basic	Yield or proof strength	When no other tensile data available
STANDARD OPTIONS		
OPTION 1 Standard	Yield or Proof Strength, Ultimate Tensile Strength	For quickest result. Mismatch in properties less than 10%
OPTION 2 Mismatch	Yield or Proof Strength, Ultimate Tensile Strength of both parent and weld metal. Mismatch limit loads	Allows for mismatch in yield strengths of weld and base material. Use when mismatch is greater than 10% of yield or proof strength (optional).
OPTION 3 SS (Stress-strain defined)	Full Stress-Strain Curves for both parent and weld metal.	More accurate and less conservative than options 1 and 2. Weld mismatch option included.
ADVANCED OPTIONS		
OPTION 4 J-Integral Analysis	Needs numerical analysis of cracked body	
OPTION 5 Constraint	Estimates of fracture toughness for crack tip constraint conditions relevant to those of cracked structure. Needs numerical cracked body analysis	Allows for loss of constraint in thin sections or predominantly tensile loadings

Figura 4. Selección de la opción de análisis a partir de los datos de tracción disponibles [11].

En concreto plantea el uso de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica, en la cual se introduce un segundo parámetro que introduce el efecto del confinamiento en el análisis. Este segundo parámetro es la tensión T en situaciones elástico-lineales y el parámetro Q en situaciones elastoplásticas [18]. El efecto del confinamiento se puede representar de dos maneras diferentes, dando lugar a los Procedimientos I (modificación del FAD manteniendo invariable la resistencia a fractura) y II (modificación de la resistencia a fractura manteniendo invariable el FAD), tal y como recogen procedimientos como el SINTAP y el R6. La formulación asociada al Procedimiento I (expresión de la Línea de Fallo) es:

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

Y la asociada al Procedimiento II (valor de la resistencia a fractura K_{mat}^c) es:

$$K_{mat}^c = K_{mat} \quad ; \beta L_r > 0 \quad (2)$$

$$K_{mat}^c = K_{mat} (1 + \alpha(-\beta L_r)^k) \quad ; \beta L_r < 0$$

en donde α y m son parámetros del material y β es una medida del confinamiento estructural cuyas expresiones, en función de T y Q son:

$$\beta = \frac{T^p}{L_r \sigma_y} + \frac{T^s}{L_r \sigma_y} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{Q}{L_r} \quad (4)$$

En ellas, σ_y es el límite elástico del material, L_r es la relación entre la carga aplicada y la carga de colapso plástico y T^p y T^s son, respectivamente, el valor de la tensión T asociado a las tensiones primarias y secundarias.

Una vez que se ha modificado la Línea de Fallo o la resistencia a fractura, la metodología de evaluación continúa como en análisis ordinarios.

A este respecto, la mayor aportación del FITNET FFS al análisis del confinamiento consiste en la simplificación del mismo gracias a que facilita la obtención de los parámetros α , k y β , lo cual venía siendo la principal dificultad para la aplicación de este tipo de evaluación. Así, en el Anexo K del Volumen III proporciona soluciones de β para algunas de las geometrías más usuales y valores de α y k para un amplio rango de materiales a partir del parámetro m de Beremin del material, del coeficiente de endurecimiento del mismo y de la relación entre el módulo de Young (E) y el límite elástico (σ_y) [19].

En el Capítulo 12 del FITNET FFS, en el que se muestra información adicional para el análisis, se recoge un procedimiento [20] que plantea un modelo global de evaluación de la pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga, que sumaría al efecto anteriormente comentado del tipo de carga y la profundidad del defecto la pérdida de confinamiento ocasionada por el efecto de entalla. En concreto se propone combinar la corrección de entalla propuesta en modelos obtenidos a partir del *Critical Average Stress Model* (CASM) [21] o de la Mecánica de la Fractura Finita (MFF) [22] con la corrección por confinamiento proporcionada por la Mecánica de la Fractura Biparamétrica que queda recogida en el Módulo de Fractura del FITNET FFS. En este caso vuelven a ser aplicables tanto el Procedimiento I (modificación del FAD) como el Procedimiento II (modificación de la tenacidad a fractura) resultando, respectivamente, las siguientes formulaciones en caso de utilizar la corrección de entalla CASM [20,23-25]:

$$K_r^{line} = f(L_r) \left(1 + \alpha (-\beta L_r)^k \right) \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{ef}}} \quad L_r \leq L_{rmax} \quad (5)$$

$$K_{mat}^c = K_{mat} \quad ; \beta L_r > 0 \quad (6)$$

$$K_{mat}^c = K_{mat} \left(1 + \alpha (-\beta L_r)^k \right) \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{ef}}} \quad ; \beta L_r < 0$$

Esta metodología se basa en la independencia [20,23-25] entre las pérdidas de confinamiento producidas por la existencia de defectos poco profundos y cargas con predominio de la tracción (tenidas en cuenta por la Mecánica de la Fractura Biparamétrica) y las producidas por el efecto entalla (recogidas por las correcciones de entalla).

El efecto de estas correcciones es una extensión de la zona de validez en el FAD en caso de utilizar el Procedimiento I (Figura 5) y un desplazamiento en vertical del punto de evaluación del componente en el caso de utilizar el Procedimiento II (Figura 6). Así, componentes que en un principio son evaluados como inseguros pasan a ser considerados seguros al tener en cuenta las diversas fuentes de pérdida de confinamiento. La inclusión del efecto entalla en el análisis no modifica la absoluta equivalencia entre los Procedimientos I y II.

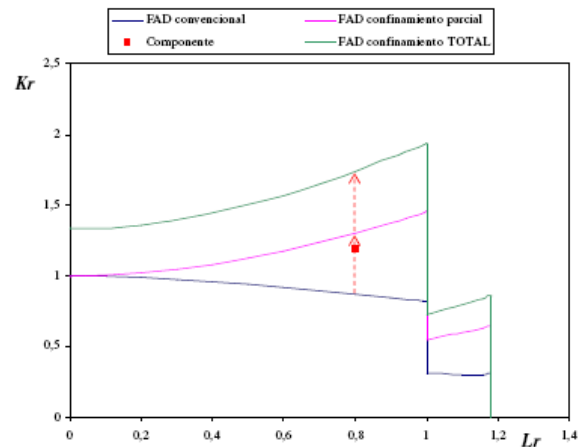


Figura 5. Procedimiento I para la evaluación global de la pérdida de confinamiento y cambio producido en la evaluación del componente (pasa de inseguro a seguro) [20].

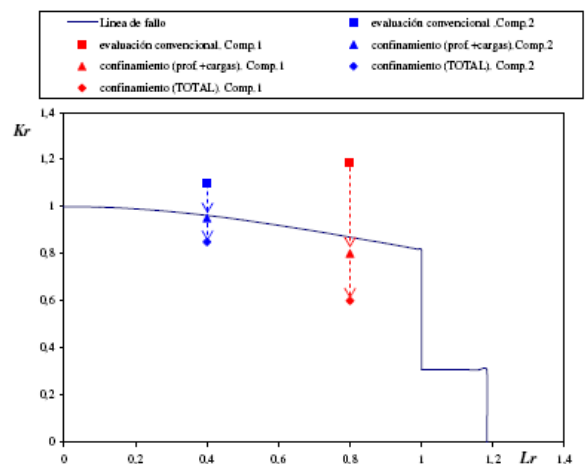


Figura 6. Procedimiento II para la evaluación global de la pérdida de confinamiento y cambio producido en la evaluación de los componentes (pasan de inseguros a seguros) [20].

Este modelo ha sido aplicado en [20] al análisis de paneles procedentes de alas de perfiles laminados en los cuales se introdujo un defecto central con distintas condiciones de confinamiento (fisura, entalla con radio en el fondo $\rho=1.2$ mm y entalla con $\rho=2.0$ mm). Dichos paneles fueron sometidos a cargas de tracción en distintas condiciones de comportamiento del material (desde frágil hasta dúctil). Los resultados obtenidos muestran la obtención de una significativa reducción

del conservadurismo obtenido y una mayor aproximación a la realidad física del problema. La Figura 7 muestra el análisis de tres de las probetas analizadas con las distintas correcciones por confinamiento practicadas, que surgen por combinación de las correcciones biparamétricas (paramétrica y Master Curve) con las correcciones de entalla (CASM y MFF).

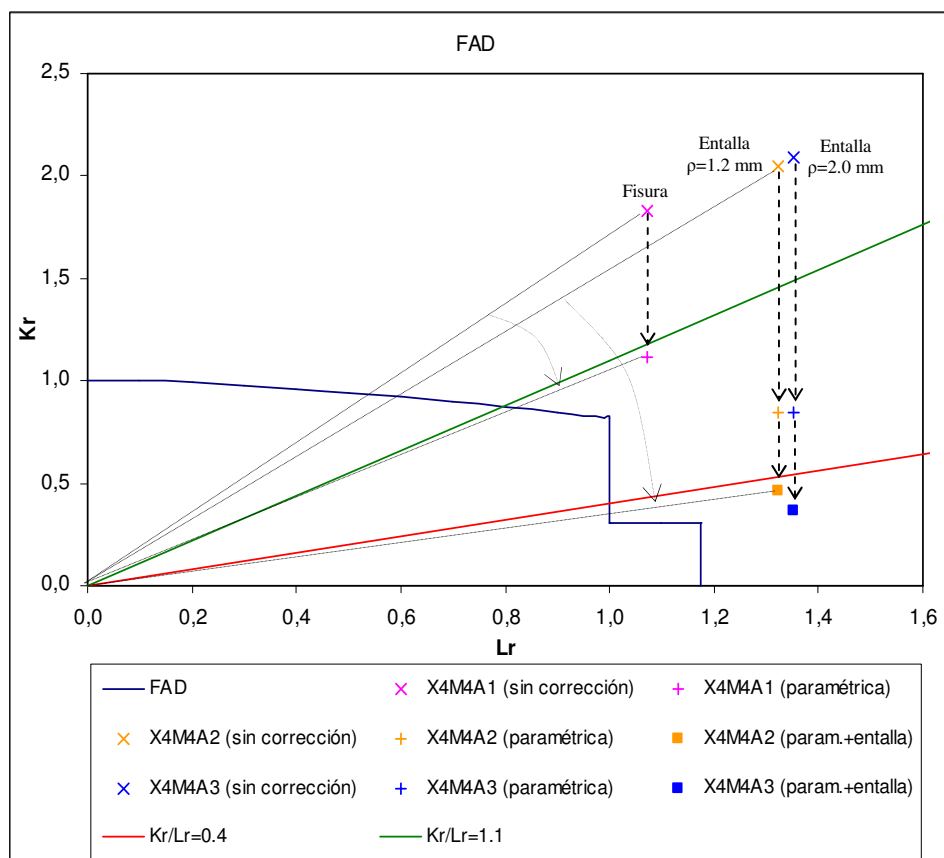


Figura 7. Análisis del efecto del confinamiento (Procedimiento II) de una probeta fisurada (X4M4A1), una entallada con $\rho=1.2$ mm (X4M4A2) y otra entallada con $\rho=2.0$ mm (X4M4A3) [20].

Se observa como sucesivas correcciones por confinamiento provocan desplazamientos en vertical del punto de evaluación. Las líneas rectas asociadas a $K_r/L_r = 0.4$ y $K_r/L_r=1.1$ limitan distintas zonas de comportamiento en rotura [6,11]. Así, para $K_r/L_r > 1.1$ la rotura se produce fundamentalmente por fractura frágil y para $K_r/L_r < 0.4$ el mecanismo dominante es el colapso plástico. Para valores entre 0.4 y 1.1 se produce una combinación de ambos mecanismos. Al aplicar las correcciones no solo se produce una reducción del coeficiente de seguridad (relación entre el segmento que va del origen al punto de evaluación y el segmento que va del origen al punto de corte del anterior con la línea de fallo), sino que también se produce una variación del mecanismo de rotura previsto, pasando de roturas frágiles a roturas con presencia de mecanismos

dúctiles o totalmente dúctiles, lo cual está de acuerdo con las observaciones experimentales [20]. Por lo tanto no sólo se reduce el conservadurismo del análisis sino que se llega a predecir el mecanismo de rotura real.

3.2. Módulo de Fatiga.

La principal novedad del Módulo de Fatiga (Capítulo 7, *Volume I*) del Procedimiento FITNET FFS es que proporciona una guía clara y definida para desarrollar los distintos tipos de análisis a fatiga existentes en función del diferente conocimiento del estado de defectos existente. La Figura 8 muestra las 5 rutas resultantes con sus distintas etapas básicas.

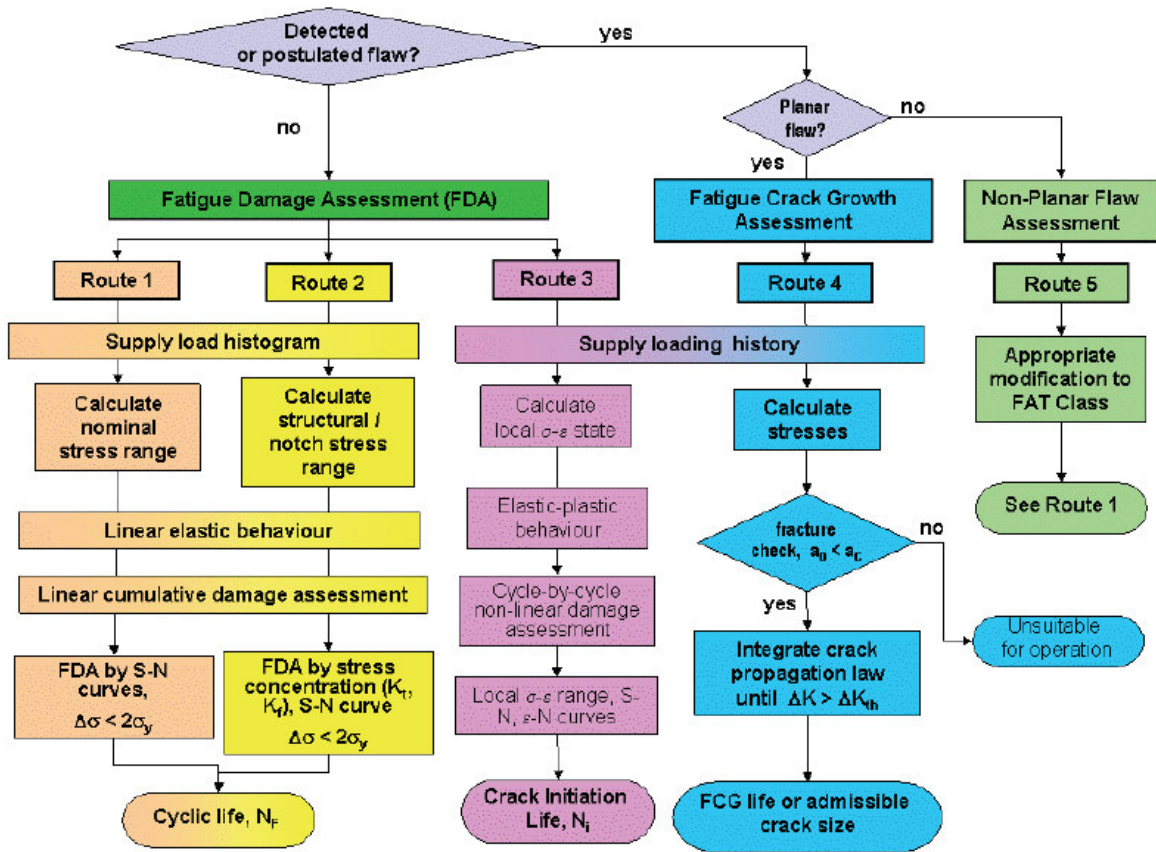


Figura 8. Rutas de análisis a fatiga del FITNET FFS y etapas básicas de las mismas [11].

Se observa que el Procedimiento distingue cinco rutas distintas. El primer criterio de elección es si se va a analizar el componente bajo la presencia de una fisura establecida (detectada o postulada). En caso negativo, resultan las Rutas 1 a 3 (*Fatigue Damage Assessment*, FDA) y en caso positivo las Rutas 4 (*Fatigue Crack Growth Assessment*) y 5 (*Non-Planar Flaw Assessment*) en función de que el defecto sea o no plano. Las características principales de las distintas Rutas son las siguientes:

- *Route 1: FDA con tensiones nominales:*

Esta Ruta considera los valores nominales elásticos de la tensión en la localización de interés.

En componentes soldados la vida a fatiga se determina a partir de un conjunto de curvas S-N (Figura 9) clasificadas de acuerdo a diferentes niveles de resistencia a fatiga para $2 \cdot 10^6$ ciclos o *FAT Classes* (función de la geometría y del material) proporcionados en el Anexo G del Procedimiento [11]. La curva S-N del componente es una recta que pasa por el punto

correspondiente al valor FAT y a $2 \cdot 10^6$ ciclos con una pendiente de 3 (5 para tensiones tangenciales) y se hace constante, como valor de durabilidad, cuando dicha recta llega a los $5 \cdot 10^6$ ciclos (10^8 en el caso de tensiones tangenciales). El FAT del componente se corrige en función de la relación entre la carga mínima y máxima (R) y del espesor del componente. Los efectos de la geometría local, de los detalles microestructurales y de la soldadura y de las tensiones residuales se incluyen en las propias curvas. En caso de amplitudes de cargas variables se aplica Palmgren-Miner [26,27]. La Figura 10 muestra como ejemplo el esquema de trabajo correspondiente.

En componentes no soldados la durabilidad se modifica para tener en cuenta factores como las discontinuidades geométricas, el espesor de la sección, la rugosidad de la superficie y la tensión media.

Del análisis se deriva una tensión nominal permisible para la vida del componente que se compara con la aplicada en el mismo.

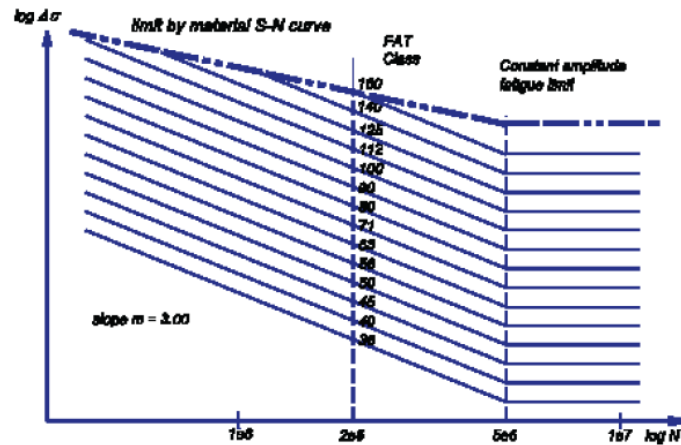


Figura 9. Curvas S-N para tensiones normales y acero [11].

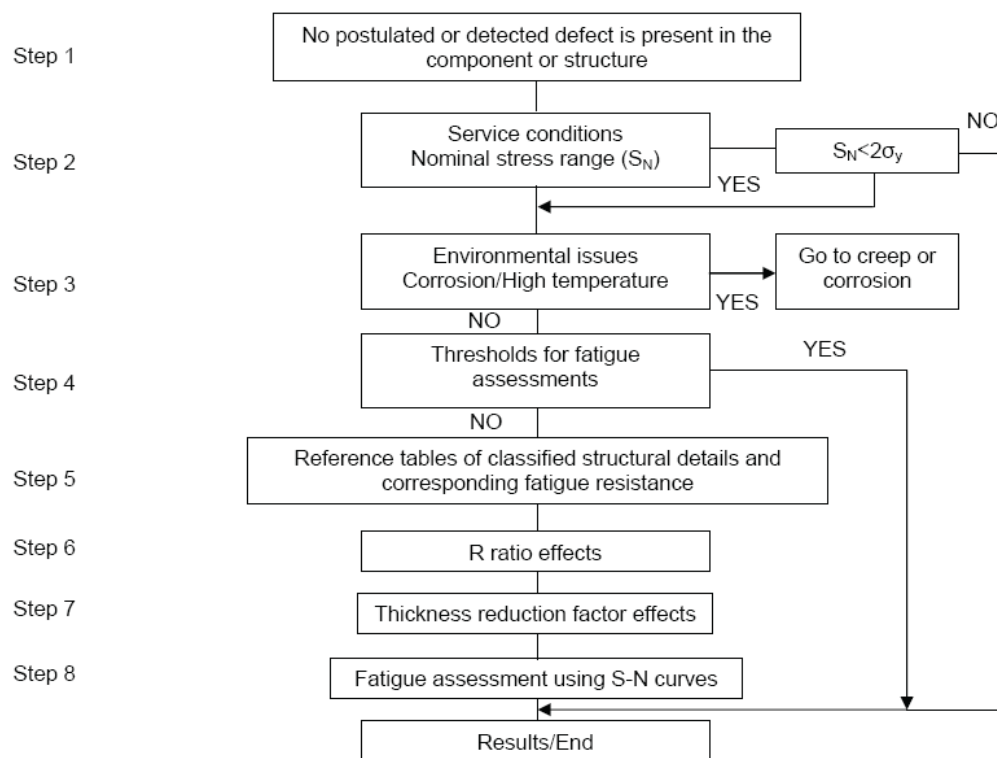


Figura 10. Ruta 1 de análisis a fatiga en componentes soldados [11].

- Route 2: FDA con tensiones locales (structural hot spot stress o notch stress):

Esta Ruta, propia de componentes con elementos concentradores de tensiones, analiza la vida a fatiga mediante dos aproximaciones distintas:

a) Cálculo de la tensión estructural local (hot spot stress) [28] y aplicación de las curvas S-N específicas

(recogidas en el Procedimiento para un buen número de casos) según la metodología explicada anteriormente.

b) Cálculo de la tensión de entalla (notch stress) a través de factores de concentración de tensiones como K_t o K_f [29] y uso de las curvas S-N específicas. En caso de amplitudes de cargas variables se aplica Palmgren-Miner.

La Figura 11 muestra la definición de las tensiones utilizadas en esta Ruta de evaluación y la Figura 12

muestra el esquema de evaluación para el caso de componentes soldados.

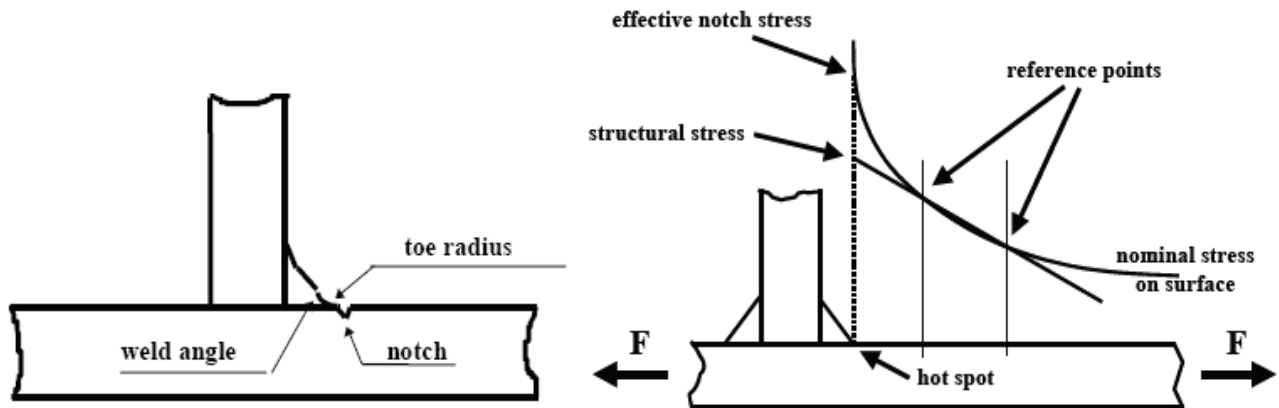


Figura 11. Hot Spot stress (o Structural Stress) y Notch Stress en una unión soldada [11].

La obtención del *hot spot stress* se puede realizar de forma analítica a partir de las tensiones obtenidas mediante técnicas de elementos finitos en unos determinados puntos de referencia (situados a una cierta distancia del elemento concentrador de tensiones que es función del espesor). Siguiendo [28], el *hot spot stress* se obtiene al multiplicar por un factor de concentración de tensiones (SCF_{HS}) el valor de la tensión nominal (Figura 11). El FITNET proporciona expresiones del SCF_{HS} para distintas situaciones de

gradiente de tensiones.

Por su parte, el *notch stress* puede calcularse directamente por elementos finitos según la teoría elástica lineal o bien de forma analítica al multiplicar el SCF_{HS} por un nuevo factor de concentración tensional que es función del tipo y geometría de la soldadura y que puede obtenerse fácilmente a partir de valores tabulados recogidos en el Procedimiento.



Figura 12. Ruta 2 de análisis a fatiga en componentes soldados [11].

- Route 3: FDA en régimen elastoplástico:

Esta ruta es aplicable fundamentalmente a componentes no soldados y utiliza un cálculo directo de las deformaciones en una localización crítica haciendo uso del comportamiento elastoplástico del material. La vida a fatiga se calcula a partir de la curva que relaciona la amplitud de deformación y los ciclos para la iniciación

o a partir de relaciones como la ley de Coffin-Manson [30,31]. A partir de este punto puede continuarse el análisis según la Ruta 4 (análisis de la propagación). La Figura 13 muestra el esquema de esta Ruta.

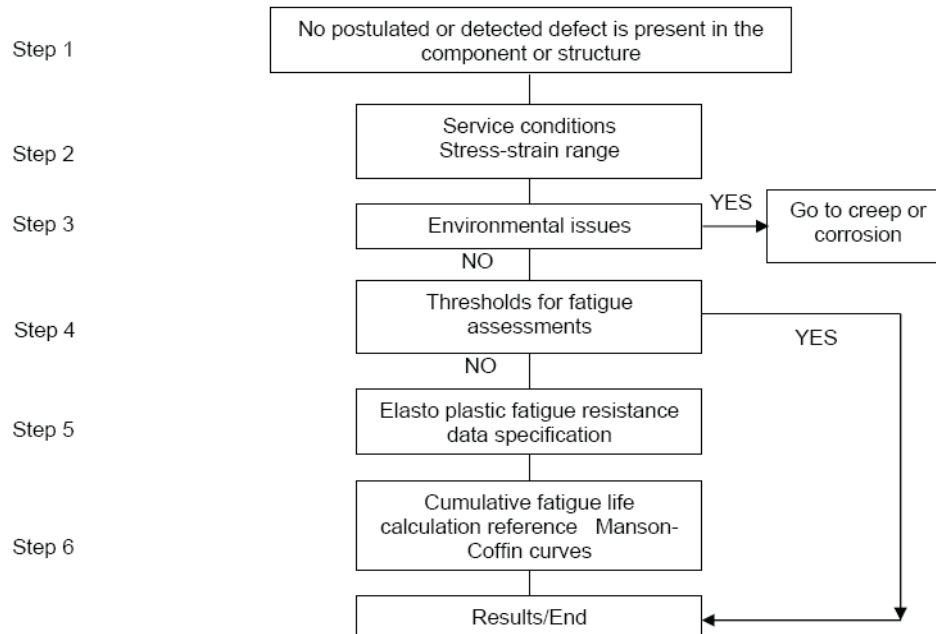


Figura 13. Ruta 3 de análisis a fatiga en componentes soldados [11].

- Route 4: Propagación de fisuras por fatiga:

Esta Ruta permite el análisis de una fisura plana detectada o postulada. La metodología básica propuesta para el análisis de la propagación es la ley de Paris pero se propone un enfoque más sofisticado basado en la ecuación de Forman-Mettu [32], la cual predice el comportamiento a fatiga del material desde variaciones tensionales propias del umbral de propagación hasta las próximas a la rotura.

- Route 5: Evaluación de defectos no planos:

Los defectos no planos pueden ser evaluados como fisuras planas siguiendo la Ruta 4, obteniéndose resultados conservadores. Existen casos en los que se pueden evaluar siguiendo las Rutas 1 y 2 utilizando las curvas S-N para uniones soldadas siempre y cuando el tamaño de los defectos no supere unos determinados límites especificados en el Procedimiento.

Finalmente, en cuanto a evaluación de componentes en fatiga, el FITNET FFS recoge aspectos como la descripción de metodologías que mejoran la vida en fatiga (*Burr Grinding, Hammer Peening ...*), opciones de análisis especiales (*Dang Van criterion,*

Análisis Multiaxial, Rolling Contact Fatigue...), interacciones de la fatiga con otros procesos de fallo como la fluencia y la corrosión y el análisis a fatiga de fisuras cortas.

En definitiva, el Módulo de Fatiga del FITNET FFS proporciona un esquema de evaluación claramente definido a través de una serie de rutas específicas y lo completa con métodos de análisis para casos concretos de gran trascendencia en la industria.

3.3. Módulo de Fluencia.

Este Módulo queda recogido en el Capítulo 8 (*Volume I*) del Procedimiento y plantea la evaluación de componentes fisurados sometidos a altas temperaturas. Está basado en la metodología propuesta en el Procedimiento R5 y divide la evaluación en las siguientes etapas (Figuras 14 y 15):

- 1) Establecer la causa de la fisuración y caracterizar el defecto inicial
- 2) Definir las condiciones de trabajo del componente
- 3) Determinar las características resistentes del material

- 4) Realizar el análisis tensional del componente
- 5) Comprobar la estabilidad con respecto a las cargas independientes del tiempo
- 6) Comprobar el efecto de la Fluencia y de la Fatiga
- 7) Calcular el tiempo hasta rotura en base al efecto inicial
- 8) Calcular el tiempo de iniciación
- 9) Calcular el tamaño de la fisura tras su crecimiento
- 10) Recalcular el tiempo hasta rotura tras el crecimiento de la fisura
- 11) Comprobar la estabilidad con respecto a las cargas independientes del tiempo tras el crecimiento del defecto

- 12) Evaluar el significado de los resultados obtenidos
- 13) Informe de resultados

Las etapas 7 a 11 son iterativas como resultado de la división de la vida del componente en periodos de tiempo lo suficientemente pequeños. Su desarrollo está detallado en dos flujogramas, según sea despreciable o no el efecto de la fatiga. La Figura 15 recoge el flujograma correspondiente al último de los casos, cuando la fatiga ha de ser considerada.

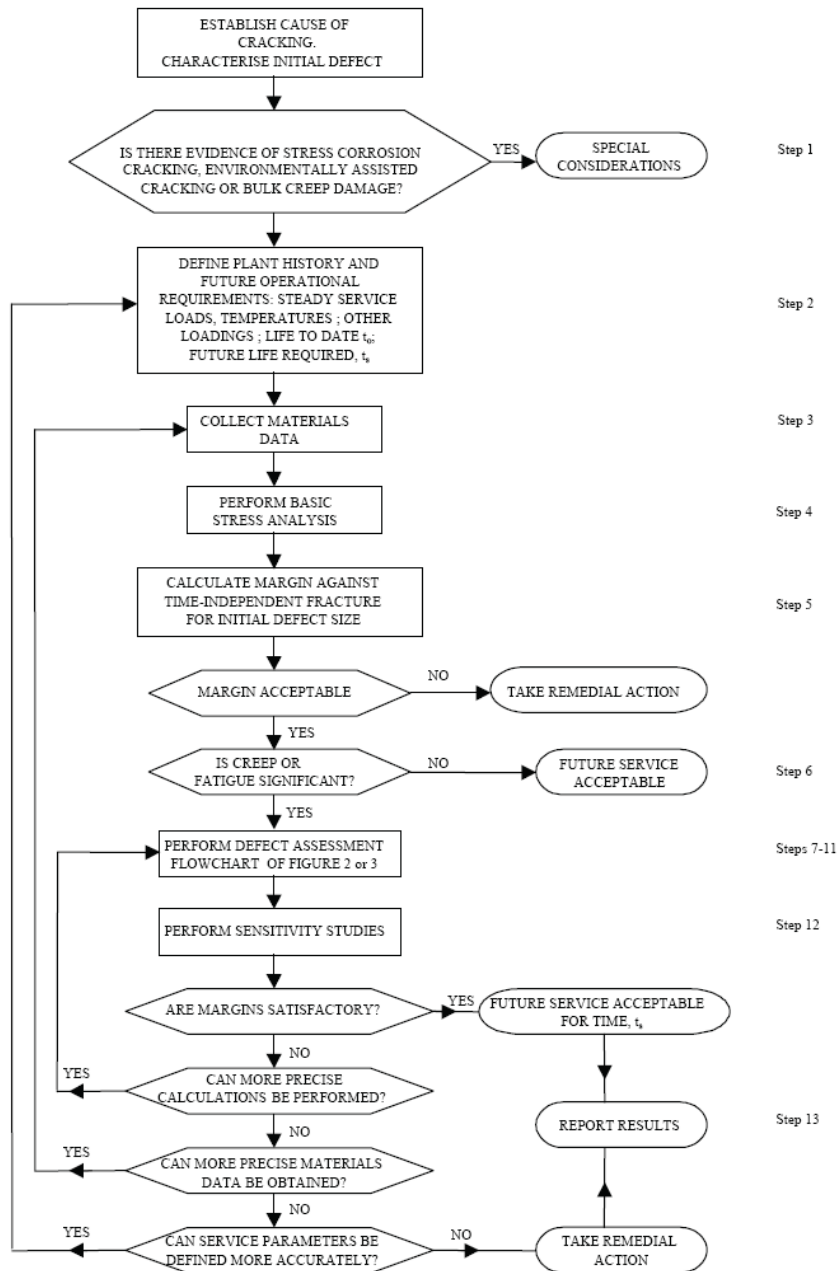


Figura 14. Esquema de evaluación del Módulo de Fluencia del FITNET FFS Procedure [11].

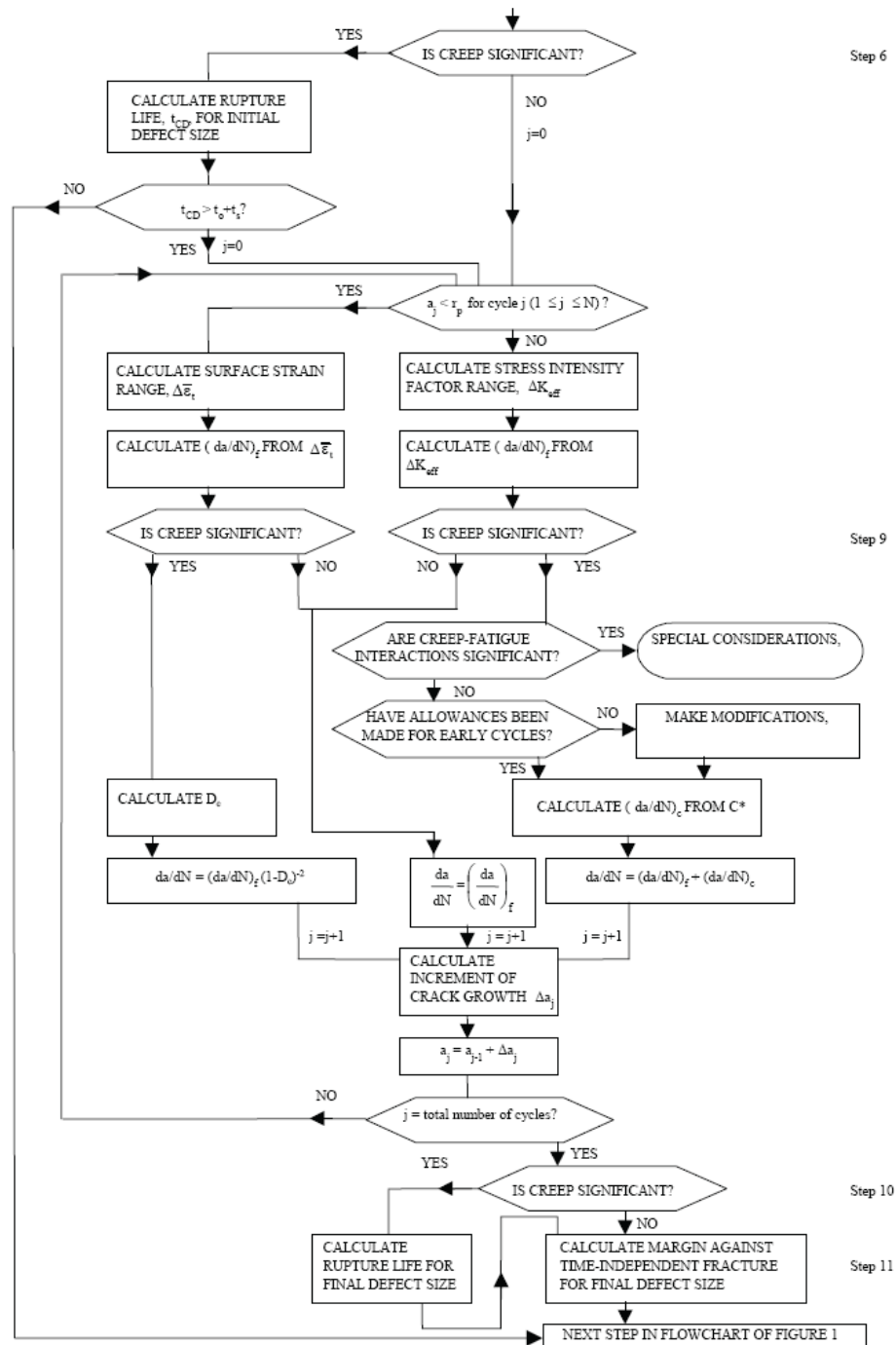


Figura 15. Evaluación del componente frente a la fluencia para los casos en los que la influencia de la fatiga es significativa [11].

Para ello, el FITNET FFS propone sumar las velocidades de propagación ocasionadas por ambos fenómenos, fluencia y fatiga, previa corrección de la velocidad de propagación por fatiga ocasionada por el efecto del daño acumulado por fluencia.

El Procedimiento recoge además nuevas metodologías de evaluación de componentes sometidos a fluencia que han aparecido en los últimos años, como la evaluación

a través de Diagramas de Fallo dependientes del tiempo (Enfoque TDFAD, *Time Dependent FAD* [3]) y el Diagrama de Dos Criterios (2CD, *Two Criteria Diagram* [33]), así como el enfoque σ_d para el cálculo del tiempo de iniciación.

3.4. Módulo de Corrosión.

Este Módulo está recogido en el Capítulo 9 del *FITNET FFS Procedure* y está dividido en dos partes fundamentales. La primera está dirigida al análisis de procesos de Fisuración Inducida por Ambiente y corrosión-fatiga y la segunda a la evaluación de secciones con pérdida de espesor.

La Figura 16 muestra el esquema de evaluación para casos de Fisuración Inducida por Ambiente y la Figura 17 recoge el Diagrama de Fallo utilizado en dichas ocasiones, el cual introduce el parámetro K_{ISCC} en la metodología FAD [34,35].

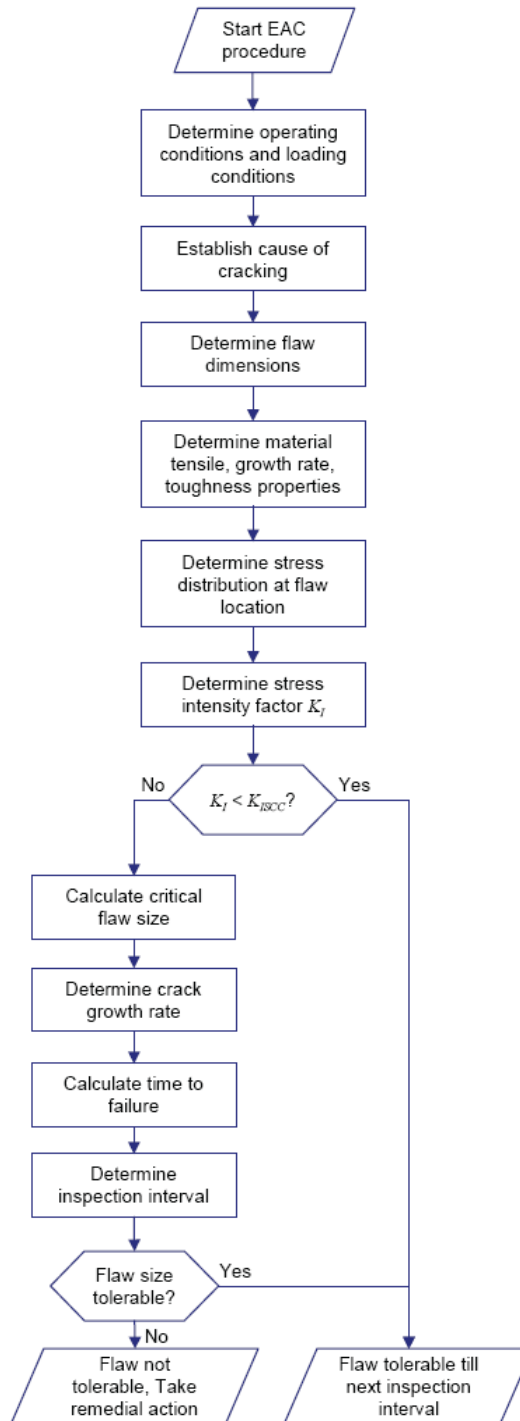


Figura 16. Evaluación del componente frente a la Fisuración Inducida por el Ambiente [11].

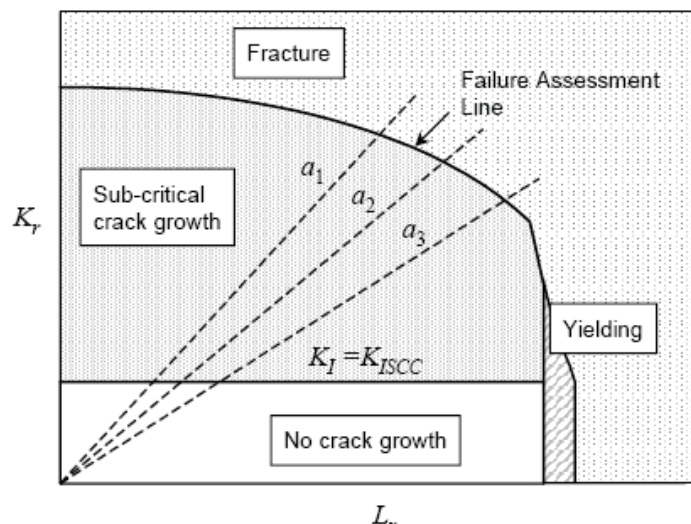


Figura 17. Utilización de la metodología FAD en la evaluación de componentes sometidos a Fisuración Inducida por el Ambiente [11,34,35].

El análisis del proceso de Fisuración Inducida por Ambiente se realizaría, basándose en la Figura 17, en una serie de etapas [34]:

1) Realización de una caracterización de fractura para el tamaño inicial de fisura, basado en el valor detectado o en un valor máximo, postulado como conservador en función de la sensibilidad del método de medida o la determinación de un defecto inicial equivalente asociado al procesado del componente [36]. Si se demuestra que el componente es aceptable, es decir, se encuentra en la parte interna del FAD de la Figura 17 pero en la zona susceptible de crecimiento de fisura (*subcritical crack growth*) se deben tomar medidas correctoras para evitar este crecimiento. Esas medidas correctoras deben tratar de conseguir la parada de fisura, de modo que $K < K_{ISCC}$, bien sea a través de la reducción de la tensión, modificando las condiciones ambientales o reparando.

2) Si las medidas correctoras no se pueden aplicar o no son funcionales pero se puede tolerar un crecimiento de fisura subcrítica lento, entonces se debe caracterizar completamente la naturaleza de la fisura y las condiciones de servicio en que se encuentra que definen su velocidad de crecimiento. Para el material, ambiente y condiciones de servicio considerados se debe realizar un análisis de crecimiento hasta fractura o hasta condiciones últimas como las de fuga antes de rotura (*Leak Before Break*, LBB), que determinan la existencia de un tamaño máximo de fisura aceptable.

3) Cálculo del estado tensional en el entorno del defecto, incluyendo cualquier componente dinámico y basándose en las condiciones de servicio previsible. En estos cálculos se ha de considerar todas las condiciones de trabajo, incluyendo las normales de servicio, las de arranque, las extremas o las de parada.

4) Determinar la evolución de la profundidad o del perfil de fisura basándose en el tamaño de defecto previo, el valor de K o ΔK y las leyes de crecimiento de fisura. Para fisuras de corrosión-fatiga se requiere un cálculo numérico ciclo por ciclo de la extensión de la fisura, considerando la frecuencia de carga, el cociente de tensiones y los efectos de cierre.

5) Determinar el tiempo o número de ciclos de tensión para que el tamaño de fisura detectado o postulado inicial alcance el límite de tamaño de defecto crítico establecido por los criterios FAD o LBB.

El componente es aceptable para continuar operando si:

- el tiempo o número de ciclos necesarios para alcanzar el tamaño de defecto límite, incluyendo un margen de seguridad apropiado, es mayor que el tiempo de operación previsto.
- el crecimiento de fisura es monitorizado cuando sea posible en línea o durante las paradas realizadas en intervalos de tiempo adecuados al crecimiento aceptable, por una técnica validada.
- la velocidad observada de crecimiento de fisura es menor que la usada en la predicción de vida remanente según los resultados de una inspección en línea o durante paradas.
- las condiciones extremas en cargas o severidad ambiental previsible, si no son evitables están consideradas en el análisis.

En cada inspección obligada, se establecerá la velocidad de crecimiento de fisura real y se reevaluarán

las nuevas condiciones del defecto para los procedimientos de esta sección. De forma alternativa, se reparará o reemplazará el componente o se aplicarán medidas mitigadoras.

La Figura 18 muestra un análisis de este tipo, correspondiente a un componente sometido a dos estados de cargas distintos que se producen de forma alternativa. La situación inicial ($a=a_0$, punto 1) queda localizada en un valor de K_I inferior a $K_{I,SCC}$, por lo que además de ser una situación segura (punto de evaluación en el interior del FAD), no se produce crecimiento subcrítico. Al pasar al segundo estado de cargas (punto 2) se supera el umbral $K_{I,SCC}$ y se produce propagación subcrítica hasta el punto 3 ($a=a_1$). Al volver al estado inicial de cargas menores se para la propagación subcrítica (punto 4). De nuevo, al aparecer el segundo estado de cargas se pasa al punto 5, volviendo a haber propagación hasta el punto 6 ($a=a_2$). El proceso anteriormente descrito se repite (puntos 7 y 8) hasta que la propagación subcrítica lleva al tamaño crítico de fisura (a_c , punto 9, o el determinado como pasante si se cumplen los criterios de LBB). Así, si se sabe la velocidad de propagación subcrítica y el tiempo que dura cada estado de cargas, se puede determinar el tiempo hasta rotura desde el estado inicial.

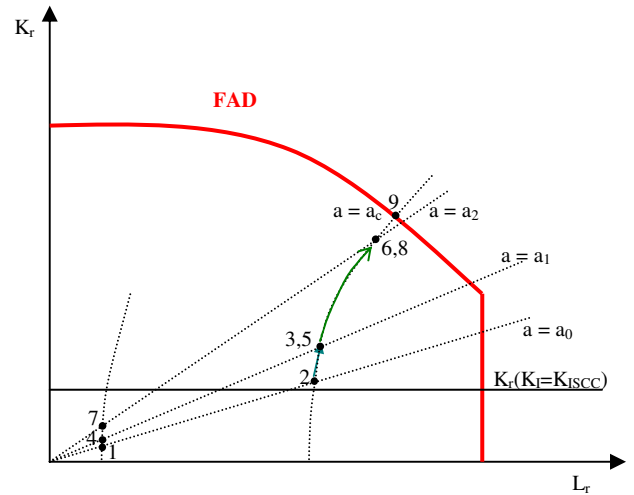


Figura 18. Ejemplo de evaluación vía FAD de la Fisuración Inducida por Ambiente.

En el caso de evaluación de pérdidas de espesor, la metodología propuesta (Figura 19) es sencilla y consiste en comparar, a través de formulaciones específicas para cada tipo de componente (codos, tubos, esferas...), la tensión aplicada con la máxima tensión admisible, cuya obtención está ligada a unos coeficientes de seguridad específicos proporcionados por el Procedimiento.

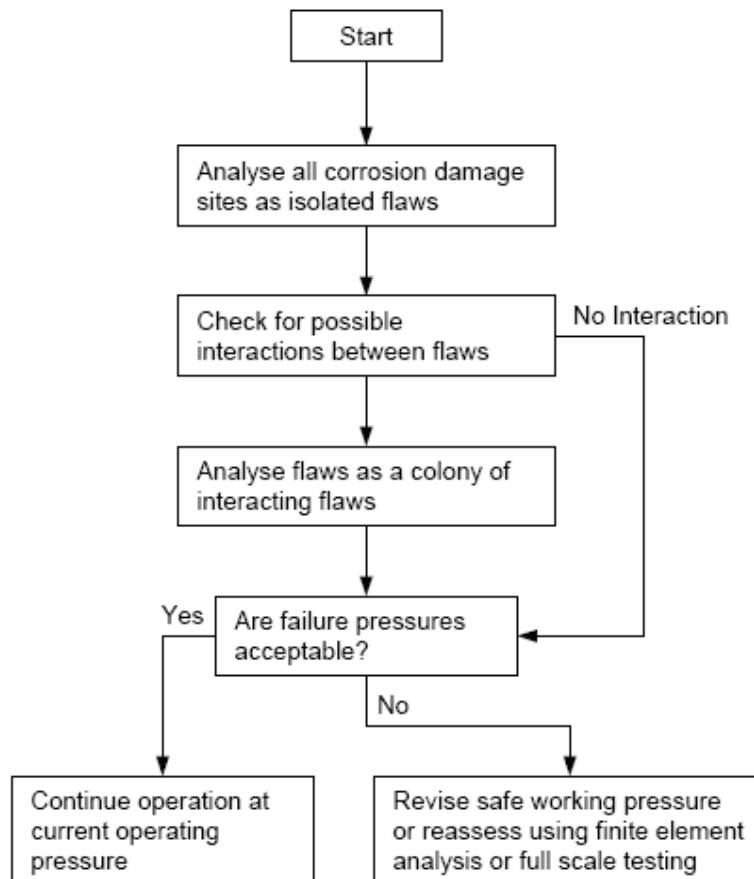


Figura 19. Esquema de evaluación de componentes con pérdidas de espesor [11].

4. METODOLOGÍAS AVANZADAS

El FITNET FFS recoge los avances más significativos de los últimos años producidos en el campo de la integridad estructural. Además de los incluidos en los Módulos anteriores, los Capítulos 11 y 12 recogen, respectivamente, metodologías alternativas de evaluación de componentes frente a la fractura e informaciones adicionales para realizar distintos tipos de análisis que sitúan al propio Procedimiento como un auténtico Estado del Arte actualizado con respecto a la evaluación de componentes y estructuras con defectos.

Así el Capítulo 11 recoge las metodologías de evaluación del *Leak Before Break* (siguiendo el esquema del SINTAP), el *Crack Arrest* (según queda recogido en el R6), el modo mixto (siguiendo también al R6), la *Master Curve* [37]... con las novedades producidas en estos campos en los últimos años.

En el Capítulo 12 se introducen metodologías de evaluación que en algunos casos no han sido incluidas previamente en ningún otro procedimiento. Destacan la *Master Curve* para materiales no homogéneos (*Bi-modal Master Curve*) [38,39] y la evaluación de componentes tipo entalla haciendo uso de la metodología FAD, tal y como ha sido explicado en el apartado 3.1.

5. CASE STUDIES AND TUTORIALS

En el *Volume II* del Procedimiento se recogen un total de 23 *Case Studies* de aplicación de los diferentes Módulos del FITNET FFS, en los cuales queda demostrada la aplicabilidad del Procedimiento en un amplio rango de problemas industriales.

A su vez, incluye un total de 12 tutoriales en los cuales se aplica el procedimiento paso a paso con el objeto de introducir al usuario en el uso del Procedimiento. El documento incluye tutoriales para los diferentes Módulos, siendo dos de ellos tutoriales cruzados, es decir, ejercicios en los que se aplican conjuntamente más de uno de los módulos.

6. ANEXOS

El *Volume III* del Procedimiento recoge una serie de anexos que facilitan notablemente el proceso de evaluación, haciendo innecesario recurrir en muchos casos a otras referencias para obtener los *inputs* del análisis, lo cual es una de las principales ventajas del FITNET FFS. En concreto recoge los siguientes:

- *Annex A*: Soluciones de Factor de Intensidad de Tensiones
- *Annex B*: Soluciones para Cargas de Colapso Plástico
- *Annex C*: Perfiles de Tensiones Residuales

- *Annex D*: Técnicas no Destructivas
- *Annex E*: Idealización y Re-caracterización de Fisuras
- *Annex F*: Interacción de Fisuras: Reglas de Combinación
- *Annex G*: *FAT Classes*
- *Annex H*: Principios de Probabilidad y Fiabilidad
- *Annex I*: No alineación de soldaduras
- *Annex K*: *Inputs* para Análisis de Confinamiento
- *Annex L*: Referencias para la Obtención de Propiedades del Material

7. OTRAS ACTIVIDADES DEL FITNET

De forma paralela a la elaboración del *FITNET FFS Procedure* se han desarrollado actividades de gran trascendencia con respecto al mismo que han completado los trabajos realizados en el marco del proyecto FITNET. En este trabajo se van a destacar la labor de formación realizada y la de estandarización.

7.1. Training & Education.

El WP6 del proyecto FITNET ha desarrollado una importante labor formativa que ha cubierto desde los conceptos más básicos de la mecánica de la fractura, la fatiga, la fluencia y la corrosión hasta las aplicaciones más avanzadas de los mismos en el propio Procedimiento [40,41]. El objetivo ha sido conseguir una adecuada transferencia de conocimiento hacia la industria que permita a los ingenieros poner en práctica las metodologías de evaluación del FITNET FFS.

Esta labor se ha realizado a través de tres herramientas fundamentales:

-*FITNET Training Seminars*: Se han realizado un total de 3 seminarios internacionales (Santander, Maribor y Miskolc) en los cuales se han desarrollado sesiones sobre fractura, fatiga, fluencia y corrosión cubriendo aspectos teóricos, introducción a los procedimientos de evaluación y ejercicios prácticos, además de sesiones de laboratorio.

- *FITNET Training Package* [12]: Se ha desarrollado una publicación de más de 500 páginas en formato powerpoint cubriendo la fractura, la fatiga, la fluencia y la corrosión y la Fisuración Inducida por el Ambiente, desde los conceptos básicos hasta ejercicios prácticos, pasando por una visión panorámica de los procedimientos de evaluación en cada campo y de la

explicación en detalle del tratamiento dado por el FITNET a cada uno de estos problemas.

- *FITNET Tutorials*: comentados anteriormente, están incluidos en el *Volume II* del Procedimiento.

7.2. Standardization.

El *FITNET FFS Procedure* tiene vocación de convertirse en una futura norma europea de integridad estructural. Una vez finalizado el Procedimiento, y a partir de los trabajos desarrollados en el seno del FITNET WP7, el documento ha sido remitido al Comité Europeo de Normalización (CEN). En este contexto ha sido abierto el *CEN Workshop Agreement 22*, que una vez finalizado de forma favorable permitirá al documento llevar el sello CEN, como primer paso en el camino de su adopción como norma europea.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración prestada a todos los miembros del proyecto FITNET (EU's Framework 5, Proposal No. GTC1-2001-43049, Contract No. G1RT-CT-2001-05071).

REFERENCIAS

- [1] British Standard BS 7910: "Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures", BSi, London, 2000.
- [2] *RCC-MR: Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires RNR*: AFCEN, 2002.
- [3] *R5, Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures*, Procedure R5 Issue 3, British Energy, Gloucester, UK, 2003.
- [4] *R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*, British Energy Generation, Report R/H/R6, Revision 4, 2001.
- [5] Bergman, M., Brickstad, B., Dahlberg, L., *A Procedure for Safety Assessment of Components with Cracks-Handbook*, SAQ/FoU Report, 91/01, AB Svensk Anläggningsprovning, Swedish Plant Inspection Ltd, 1991.
- [6] *SINTAP, Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry*, SINTAP BRITE-EURAM Project BRPR-CT95-0024, 1999.
- [7] *API 579, Recommended Practice for Fitness for Service*, Draft Issue 4, American Petroleum Institute, 1996.
- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *Section XI, Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components*, The American Society of Mechanical Engineers, 1995.
- [9] JSME, *Codes for Nuclear Power Generation Facilities- Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plants*, JSME S NC1, 2001.
- [10] *FITNET, European Fitness-for-Service Network*, EU's Framework 5, Proposal No. GTC1-2001-43049, Contract No. G1RT-CT-2001-05071.
- [11] *FITNET FFS Procedure*, Final Draft MK7, Prepared by European Fitness-for-Service Network-FITNET, 2006.
- [12] Gutiérrez-Solana, F., Cicero, S., Álvarez, J.A., Lacalle, R., *FITNET Training Package*, Universidad de Cantabria, 2006.
- [13] *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 67, Issue 6, Pages 481-668, 2000.
- [14] Gutiérrez-Solana, F., Ruiz, J., Ainsworth, R.A., Kim, J.-Y. y Zerbst, U., *Driving Force and Failure Assessment Diagram Methods for Defect Assessment*, Proceedings of 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1998), 1998.
- [15] Ruiz Ocejo, J., Gutiérrez-Solana, F., González-Posada, M.A., y Gorrochategui, I., *Failure Assessment Diagram-Crack Driving Force Diagram COMPATIBILITY*, SINTAP Task 5, Report SINTAP/UC/05, 1997.
- [16] Ainsworth, R. A., Gutierrez-Solana, F. and Ruiz Ocejo, J., *Analysis Levels within the SINTAP Lefect Assessment Procedures*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, Issue 6, p. 515-527, 2000.
- [17] Kim, Y.-J., *Comparison: Various Levels of the SINTAP Procedure for Homogeneous Structures*, SINTAP Task 1, Report SINTAP/GKSS/17, 1998.
- [18] Anderson T. L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [19] *VOCALIST, Validation of Constraint Based Assessment Methodology in Structural Integrity*, FIKS CT-2000-00090, Fifth Framework of the European Atomic Energy Community (EURATOM).
- [20] Cicero, S., *Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Sometidos a Condiciones de Bajo Confinamiento*, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2007.
- [21] Kim, J.H., Kim, D.H., 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, p.381-384, 2004.
- [22] Taylor, D., Cornetti, P. y Pugno, N., *The Fracture Mechanics of Finite Crack Extension*, Engineering Fracture Mechanics, 72, Issue 7, p. 1021-1038, 2005.
- [23] Cicero, S., Ainsworth, R.A., *The Treatment of Constraint Effects in Integrity Evaluations*, Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2005), Halkidiki, Grecia, 2005.
- [24] Cicero, S., Ainsworth, R.A., Gutiérrez-Solana, F., Álvarez, J.A. *El Tratamiento del Confinamiento en las Evaluaciones de Integridad Estructural*, Anales de Mecánica de la Fractura. XXIII Congreso Anual del Grupo Español de Fractura, Vol. 23, Albarracín, 2006.
- [25] Cicero, S., Ainsworth, R.A., Tkach, Y., *The Treatment of Constraint in FITNET FFS Procedure*, Proceedings of International Conference on Fitness for Service FITNET 2006, Amsterdam, Holanda, 2006.
- [26] Palmgren, A., *Die Lebensdauer von Kugellagern*, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 68:339-341, 1924.
- [27] Miner, M. A., *Cumulative damage in fatigue*, Journal of Applied Mechanics, 12:159-164, 1945.
- [28] *IIV Structural Hot-Spot stress approach to fatigue analysis of welded components –doc XIII-1819-00*.
- [29] *Bureau Veritas rules for steel ships classification – Fatigue check of structural details – Part B*, Chapter 7, Section 4 – Edition May 2003.
- [30] Coffin Jr., L. F., *A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal*, Trans. of ASME, 76 , pp 931-950, 1954
- [31] Manson, S. S., *Fatigue, a complex subject: some simple approximations*, Exp. Mech., 5, pp 193-226, 1965.
- [32] Forman, R.G. and Mettu, S.R., 1992. *Behaviour of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in a Ti-6Al-4V alloy*. Ernst, H.A., Saxena, A. and McDowell, D.L. Editors., Fracture Mechanics 22th Symposium 1 American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 519–646, ASTP STP 1131, 1992.
- [33] Ewald, J., Sheng, S., Klenk, A., and Schellenberg, G., *Engineering Guide to Assessment of Creep Crack Initiation on Components by Two-Criteria-Diagram*, Int. J. Pres. Ves. Piping, 78, 937-949, 2001.
- [34] Álvarez, J.A, Gutiérrez-Solana, F., Cicero, S., *Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Frente a Procesos de Fisuración Inducida por Ambiente*, Anales de Mecánica de la Fractura. XXIII Congreso Anual del Grupo Español de Fractura, Vol. 23, Albarracín, 2006.
- [35] Turnbull, A., Koers, R.W.J., Gutiérrez-Solana F., and Alvarez, J.A., *Environment induced cracking-a Fitness for Service Perspective*, Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2005), Halkidiki, Grecia, 2005.
- [36] *Performance Criteria for Cold Formed Structural Steels*, Corus, Universidad de Cantabria, IEHK-RWTH, Labein, Contract No 7210-PR/246, European Commission, 2003
- [37] Wallin, K., *The Scatter in K_{IC} Results*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, p. 1085-1093, 1984.
- [38] Wallin, K., Nevasmaa, P., Laukkanen, A. and Planman T., *Master Curve Analysis of Inhomogeneous Ferritic Steels*. Engineering Fracture Mechanics 71, pp. 2329-2346, 2004.
- [39] Nevasmaa, P., Laukkanen, A., Planman, T. and Wallin, K., *A Novel Method for Fracture Toughness Assessment of Inhomogeneous Ferritic Steel Weldments using Bimodal Master Curve Analysis*. Proceedings of the "11th International Conference on Fracture (ICF XI)", Turin, 20-25, 2005.
- [40] Cicero, S., Gutiérrez-Solana, F., Álvarez, J.A., *The Education and Training Content of FITNET*, Proceedings of International Conference on Fitness for Service FITNET 2006, Amsterdam, Holanda, 2006
- [41] Cicero, S., Gutiérrez-Solana, F., Álvarez, J.A., *Una Experiencia Educativa dentro del V Programa Marco: el Work Package 6 (Training and Education) del Proyecto FITNET*, Anales de Mecánica de la Fractura. XXIV Congreso Anual del Grupo Español de Fractura, Vol. 24, Burgos, 2007.