

ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE DIVERSOS COMPONENTES DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

S. Cicero, F. Gutiérrez-Solana, J. A. Álvarez

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 las Castros s/n 39005 Santander

Resumen. En el presente artículo se analiza la integridad estructural de diferentes tipos de tubos de material P91 utilizados en distintos componentes de una planta de generación de energía en construcción. La aparición de tres roturas en otros tantos tubos durante el proceso constructivo y de montaje hace necesario un análisis en profundidad que determine si cabe esperar un fallo generalizado del resto de componentes o si, por el contrario, son hechos puntuales y las medidas tomadas hasta ahora (fundamentalmente un post-tratamiento térmico de las uniones) son suficientes para garantizar el correcto funcionamiento de la planta.

Abstract. This document analyzes the structural integrity of different tubes of material P91 used in a Power Station. The appearance of three failures in different steps of the Station construction makes necessary to perform a deep analysis in order to determine if it is possible the generalised failure of the rest of components or, in the contrary, the actions performed until now (post-weld heat treatment) are enough to ensure the correct operation of the plant.

1. INTRODUCCIÓN

Tras el transporte (primero por mar y posteriormente por carretera) de los componentes de una planta de generación de energía al lugar de construcción de la misma y un breve periodo de almacenamiento (lo cual llevó un total de entre siete y ocho semanas) se produjo la rotura de dos tubos en la zona afectada térmicamente (ZAT) de su unión soldada con el *lower header*. Estos tubos se enviaron a una ingeniería independiente para que realizase un estudio con el objetivo de determinar las causas de las roturas (Fig. 1).

Como resumen de las conclusiones alcanzadas por los técnicos de tal ingeniería, cabe destacar que justifican la rotura de los tubos señalando que se produjo una propagación de fisuras como consecuencia de un proceso de Fisuración Inducida por Hidrógeno (FIH). Las medidas de dureza en la ZAT y en la propia soldadura dieron valores muy elevados de la misma (llegando a superar 500 HV), lo cual justifica una microestructura martensítica y por ello que el material fuera muy sensible a procesos de FIH. La presencia de martensita concuerda con la propagación intergranular observada en las secciones rotas. Todo ello indica que el tratamiento térmico realizado por el fabricante sobre las uniones soldadas fue, cuando menos, insuficiente. En las dos roturas observadas, la iniciación de las fisuras se produjo en el exterior de los tubos y propagaron hacia el interior (Fig. 1 y 2).



Fig. 1. Detalle de las secciones de rotura

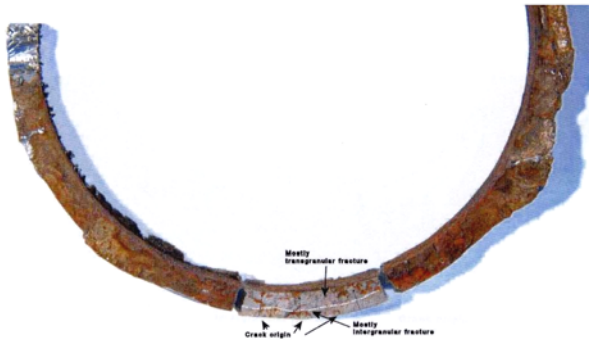


Fig. 2. Esquema de los micromecanismos de rotura

La consecuencia lógica del mencionado estudio fue la realización in situ de un nuevo tratamiento térmico que redujese la dureza del material (y por tanto su sensibilidad a la FIH, así como su fragilidad). El tratamiento consistió en un calentamiento hasta una temperatura de $758\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de aproximada de 80 K/h, 2 horas a la temperatura máxima y, finalmente, enfriamiento lento al aire, todo ello con el objetivo de relajar las tensiones residuales y modificar la microestructura. Las medidas de dureza realizadas en el material con posterioridad al tratamiento dieron valores de entre 200 y 280 HV. Durante el proceso se produjo una nueva rotura (Fig. 3). En este caso la rotura fue justificada como consecuencia de la existencia de una fisura inicial interna generada por FIH que, sometida a las tensiones térmicas del tratamiento de recuperación de la soldadura, propagó hasta hacerse pasante.



Fig. 3. Sección de la tercera rotura

Además, con el objeto de determinar si existían más fisuras en el resto de componentes, se realizó un análisis con líquidos penetrantes y con técnicas de inspección de partículas magnéticas sobre el exterior de las todas las uniones. No se detectó ninguna fisura externa, pero la incertidumbre con respecto a la existencia de fisuras internas aún persistía.

Ante esta situación el cliente contactó con el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de

Materiales (LADICIM) de la Universidad de Cantabria para solicitar un asesoramiento sobre la posibilidad de existencia de otras fisuras internas, así como las consecuencias que éstas tendrían en las condiciones de operación de la planta.

2. ANÁLISIS PREVIO

El estudio detallado de los hechos acaecidos así como de los informes realizados al respecto permite estar de acuerdo tanto con la metodología de los análisis como con las conclusiones alcanzadas por dichos trabajos. Parece clara la existencia de un proceso de FIH (propagación IG observada) que conduce al fallo de los dos primeros tubos y a la generación de una fisura que provoca la rotura del tercer tubo durante el tratamiento térmico in situ.

Para que ocurra un proceso de FIH es necesario, por una parte, la presencia de hidrógeno (totalmente justificada al realizarse por mar el transporte de la estructura) y de un material sensible (tal como ocurre con la estructura martensítica de la zona de las uniones soldadas, justificada por los altos valores de dureza encontrados) y, por otra, la presencia de defectos (común en soldaduras) y de tensiones locales (en este caso, tensiones residuales ocasionadas por el proceso de soldadura). La sollicitación viene definida por el factor de intensidad de tensiones K_I , y la resistencia del material a la propagación de fisuras por presencia de hidrógeno viene dada por el parámetro K_{ISCC} , que es una propiedad intrínseca del material dadas unas condiciones ambientales determinadas. Si $K_I > K_{ISCC}$, se producirá propagación.

Una vez superada la resistencia del material dada por el referido valor umbral (en este caso $K_{ISCC} \sim 10\text{-}20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, valores propios de la microestructura martensítica), se produce propagación de fisuras a una velocidad prácticamente constante, que en microestructuras martensíticas se sitúa entre 10^{-6} y 10^{-7} m/s [1-6], velocidad que justifica que en pocas semanas fallasen dos de las uniones. A estas velocidades de propagación, una fisura alcanzaría una profundidad de 2 mm (que es, aproximadamente, la encontrada en las roturas) en pocas horas. Realmente el proceso es más lento, del orden de varias semanas, porque requiere un tiempo de iniciación y porque a medida que la fisura propaga va entrando en zonas que se encuentran en condiciones menos exigentes bien en sollicitación, porque partiendo desde la superficie exterior las tensiones residuales derivadas del proceso de soldadura decrecen en profundidad, bien en susceptibilidad al entrar la fisura en zonas de microestructura menos sensible (como la bainítica), zonas parcialmente revenidas o material no afectado térmicamente, en las que la propagación es más lenta, con diferencia de uno o más órdenes de magnitud.

3. SITUACIÓN TRAS LAS INSPECCIONES

Las inspecciones realizadas sobre el exterior de las uniones no detectaron nuevas fisuras, pero sin embargo no se podía asegurar que en el interior de aquellas no hubiera ninguna.

El hecho de que no hubiera más fisuras exteriores hacía estadísticamente muy improbable que el número de fisuras interiores fuese elevado por lo que, de haber fisuras, cabía suponer que no eran muchas. Además, en caso de existir, se podía justificar que su tamaño estaba acotado con una probabilidad elevada de que fuese pequeño, teniendo en cuenta la historia de los componentes desde su fabricación. Debe considerarse que tras el proceso de soldadura aparecen en las uniones tensiones residuales del orden del límite elástico. Esto provoca que el factor de intensidad de tensiones alcance el valor de K_{ISCC} para fisuras realmente pequeñas, de tal manera que a partir de un determinado valor en su longitud las fisuras hubieran propagado y producido roturas. Es decir, igualando K_I (considerando $\sigma = \sigma_y$ y dejando la longitud de fisura, a , como incógnita) a K_{ISCC} , se obtiene un límite máximo de la longitud que tienen las fisuras existentes (en caso de haberlas) obviando la posibilidad de que otras fisuras hubieran propagado en un principio y parado posteriormente por las razones expuestas con anterioridad (en el caso de que la fisura alcanzase una zona no afectada por el proceso de soldadura, y por tanto más tenaz, o bien que la sollicitación local disminuyera, la fisura podría haber crecido en un principio para, posteriormente, haberse parado con un tamaño superior que el dado por el análisis anterior).

El análisis descrito se realizó para tubos tipo RHTR2 y HSPHTR3 y para geometrías de fisura internas de sección semicircular ($l=2a$) e internas circunferenciales (esta última geometría da similares resultados, del lado de la seguridad, a los de las fisuras semielípticas de semeje mayor la mitad del arco de circunferencia del tubo, que se corresponde con la geometría observada en las roturas). La Fig. 4 muestra tales geometrías:

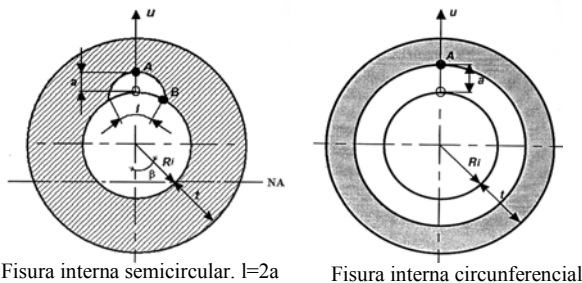


Fig. 4. Geometrías de fisura consideradas

Así mismo, se han considerado dos valores de K_{ISCC} : $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (que ofrecerá resultados del lado de la seguridad), como extremos del que

corresponde a las estructuras martensíticas observadas. Los resultados obtenidos se muestran Tabla 1.

Tabla 1. Máximas longitudes de fisura para las cuales no se hubiese producido FIH

	Fisura semicircular	Fisura circunferencial
$K_{ISCC} = 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	$a_0 = 0,35 \text{ mm}$	$a_0 = 0,12 \text{ mm}$
$K_{ISCC} = 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	$a_0 = 1,40 \text{ mm}$	$a_0 = 0,48 \text{ mm}$

Estas longitudes de fisura son las que se van a considerar en los cálculos de integridad estructural bajo condiciones de fatiga y de fluencia que se realizarán posteriormente. Junto a estas, se considerará otra fisura con una profundidad más conservadora (cuya probabilidad es muy baja) de 1.8 mm como límite máximo de todas aquellas que pudieran haber iniciado su propagación y se hubieran detenido. Este límite se ha tomado por ser aproximadamente la profundidad de fisura aparecida en la rotura ocasionada durante el tratamiento térmico in situ. No cabe esperar que haya fisuras mayores a esta ya que, de haber existido, hubiesen producido el fallo de su sección durante dicho tratamiento.

4. CÁLCULOS INICIALES Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

Tras el análisis previo se debe considerar que no es descartable la existencia de fisuras interiores pero que, en todo caso, es altamente probable que en caso de existir su número sea muy reducido y su tamaño esté acotado. A continuación se estudia la integridad estructural de los tubos (y por lo tanto el buen funcionamiento de la central) asumiendo la existencia de dichas fisuras y bajo las seis hipótesis de fisura (dos tipos de geometría y tres profundidades diferentes) que se derivan de los razonamientos anteriores. De esta manera no sólo se conoce lo que ocurre ante la situación más conservadora, si no que además se obtiene la influencia que tiene el tipo o geometría y el tamaño de la fisura considerada en los resultados obtenidos.

En primer lugar hay que analizar qué fenómenos van a determinar la vida de los componentes de la central. Se distinguen dos procesos principales:

- **FLUENCIA:** los distintos tubos trabajan a temperaturas en torno a los $550 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que pueden darse procesos de propagación de fisuras por fluencia que conduzcan bien al fallo por fluencia generalizada, bien a la rotura por FRACTURA-COLAPSO PLÁSTICO. Durante el funcionamiento normal de la central se considera que las tensiones que soportan los tubos y las uniones son únicamente las tensiones térmicas, del orden de 10^2 MPa , despreciando por tanto el efecto de la presión interna, que produce tensiones del orden de 10^1 MPa , y el del peso propio, que por

hipótesis vamos a suponer que no genera grandes tensiones.

- **FATIGA:** el ciclo normal de operaciones de la central lleva asociado una serie de transitorios que provocan variaciones de tensiones que a su vez generan la propagación de fisuras por fatiga. Las fisuras alcanzan finalmente un tamaño tal que se produce el fallo por FRACTURA-COLAPSO PLÁSTICO. A partir de los datos suministrados por el cliente, se consideró tan sólo el transitorio denominado "hot start", dado que era el responsable de la práctica totalidad del daño por fatiga evaluado por el proyectista. Se considerarán un total de 5000 ciclos de este tipo en los 25 años para los que se proyecta la central.

- **INTERACCIÓN FLUENCIA-FATIGA:** dado que ambos fenómenos se producen simultáneamente, las fisuras propagan debido a la interacción de los dos procesos. Los cálculos realizados demostraron que el proceso que determina la integridad de los componentes era la fluencia, siendo la fatiga prácticamente despreciable.

El procedimiento utilizado para los cálculos de fluencia y de fatiga fue el R5 [7], mientras que para los cálculos de fractura se utilizaron el SINTAP [8] (correlaciones charpy-tenacidad y diagramas de fallo) y el SAQ [9] (expresiones del factor de intensidad de tensiones y de la carga límite).

En un principio no había un conocimiento exacto de las tensiones actuantes en los tubos durante la operación de la planta y durante los hot starts, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad considerando distintos valores de las mismas en torno al 40 % del límite elástico a la temperatura de trabajo, valor de referencia en el diseño de componentes. De este modo se obtuvieron seis gráficas como las mostradas en las Fig. 5a y 5b (dos por cada uno de los tres tipos de tubos):

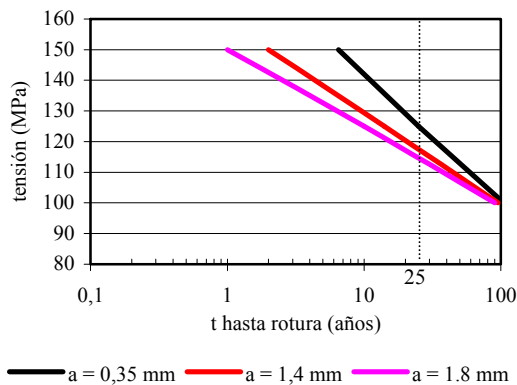


Fig. 5a. Tiempo hasta rotura en función de la tensión aplicada en tubos tipo reheater con fisura semicircular.

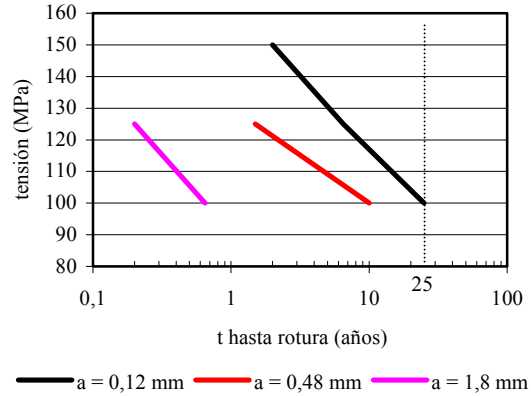


Fig. 5b. Tiempo hasta rotura en función de la tensión aplicada en tubos tipo reheater con fisura circunferencial.

En la Tabla 2 se muestra la máxima tensión admisible en los distintos tubos, y para las distintas hipótesis de geometría de fisura inicial, de tal manera que la vida de los mismos sea, al menos, 25 años, tal como se puede deducir de las gráficas correspondientes:

Tabla 2. Tensión máxima admisible para que el tiempo hasta rotura sea superior a 25 años

REHEATER

	$a_0 = 0.35 \text{ mm}$	$a_0 = 1.40 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F.semicircular	125 MPa	117 MPa	115 MPa

	$a_0 = 0.12 \text{ mm}$	$a_0 = 0.48 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F.circunf.	100 MPa	85 MPa	20 MPa

SUPERHEATER e=46 mm

	$a_0 = 0.35 \text{ mm}$	$a_0 = 1.40 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F.semicircular	150 MPa	132 MPa	127 MPa

	$a_0 = 0.12 \text{ mm}$	$a_0 = 0.48 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F. circunf.	125 MPa	100 MPa	20 MPa

SUPERHEATER e=56 mm

	$a_0 = 0.35 \text{ mm}$	$a_0 = 1.40 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F.semicircular	110 MPa	100 MPa	93 MPa

	$a_0 = 0.12 \text{ mm}$	$a_0 = 0.48 \text{ mm}$	$a_0 = 1.80 \text{ mm}$
F.circunf.	90 MPa	75 MPa	25 MPa

El análisis de estos resultados permite realizar las siguientes observaciones:

- El proceso que determina la vida de los componentes estudiados de la central es la FLUENCIA, es decir la propagación de fisuras hasta rotura debida a las condiciones de trabajo a altas temperaturas a las que está sometido el material. La FATIGA tiene un efecto mucho menor.

- Considerando la hipótesis más probable para las longitudes de las fisuras existentes (las derivadas de la hipótesis de FIH), el fallo de los componentes se produce en un tiempo del orden de años, siendo el resultado bastante crítico (pocos años de vida) para valores de tensiones exigentes. El tiempo de vida que corresponde a las situaciones reales de sollicitación debe marcar los periodos de inspección que permitan detectar las posibles fisuras existentes en régimen de propagación.

- En el caso de considerar fisuras del orden de 1.8 mm (caso muy poco probable) el fallo podría producirse en muy poco tiempo (semanas) bajo la hipótesis de fisura circunferencial y tensiones elevadas.

- Para igualdad de tensiones consideradas, los tubos tipo superheater son los que están en peores condiciones, ya que la combinación de tensiones, temperaturas y condiciones geométricas resulta más exigente.

- Se observa una gran diferencia entre los resultados obtenidos para las dos hipótesis de geometría de fisura. Son mucho más críticos los correspondientes a la fisura circunferencial. Parece razonable que, en caso de existir fisuras, estas estén más próximas a la geometría semicircular pero hay que tener en cuenta que con el tiempo crecen y pueden juntarse, provocando finalmente una fisura circunferencial (o semicircunferencial, de resultados muy similares). La situación real estará pues entre las dos estudiadas y, muy probablemente, más próxima a la hipótesis de fisura semicircular (la menos crítica). A medida que las fisuras crezcan e interactúen entre sí el proceso de propagación de la fisura y de avance hacia el fallo del componente se acelerará.

- Se observa una gran sensibilidad del resultado con respecto a los niveles de tensiones considerados. Para unas condiciones dadas, una variación de +/- 20 % en la tensión considerada puede suponer pasar de decenas de años de tiempo de vida a unidades o centenas. Es decir, un 20 % de variación de tensión supone una variación de un orden de magnitud en la vida.

- El conocimiento de las tensiones que realmente están actuando en los tubos nos permitiría prever la situación futura en función de las distintas hipótesis. En caso de que dichas tensiones fuesen inferiores a las consideradas en el análisis de sensibilidad, se podría llegar a la situación de incluso desechar la posibilidad de fallo a lo largo de la vida de la central aun en el caso de que haya fisuras pésimas de 1.8 mm.

5. REFINAMIENTO DEL CÁLCULO

Los resultados de los cálculos iniciales llevaban a la conclusión de que, por una parte, con los datos disponibles no se podía descartar la rotura de los tubos

durante la vida operativa de la planta y, por otra, que el conocimiento de las tensiones actuantes realmente permitiría conocer con mucha mayor exactitud la situación futura de los distintos componentes.

Por este motivo el cliente decidió realizar un análisis estructural de los distintos componentes en sus condiciones de trabajo. El estudio justificó unas tensiones máximas de 15 MPa en la unión del *reheater* con el *lower header* y de 45.2 MPa en el caso del *superheater*. Estos valores son notablemente menores que los considerados en el análisis de sensibilidad y pudo observarse a partir de una simple extrapolación en las figuras análogas a la Fig. 5 que para la mayoría de las hipótesis, salvo la de fisura circunferencial de 1.8 mm en el *superheater*, la vida de los componentes es mayor de 25 años. Sin embargo, usando los valores exactos de las tensiones actuantes se procedió a la repetición de todo el proceso de cálculo de los componentes frente a la fluencia y a la fatiga. Los resultados obtenidos muestran que para los tres tipos de componentes y para las tres hipótesis de fisura consideradas, el fallo de aquellos se produce en un periodo mayor de 25 años en todos los casos. En concreto, los resultados dan valores de vida de los componentes del orden de cientos de años para la mayoría de los casos.

Este resultado se justifica con el hecho de que la fluencia es un proceso muy sensible a las tensiones aplicadas y que crece exponencialmente con las mismas. Así mismo, ya quedó comentado que los valores de tensiones del análisis de sensibilidad para los cuales el fallo se producía a los 25 años, fueron obtenidos en los casos mas críticos (y por lo tanto, a los que corresponden tensiones más bajas) mediante extrapolación, mientras que en el refinamiento del cálculo se han realizado cálculos para la situación real. La extrapolación llevaba a resultados conservadores ya que la curva tensión actuante-vida del componente reduce su pendiente negativa al disminuir las tensiones.

Finalmente, se calculó el mayor tamaño de fisura para el caso más pesimista de geometría de fisura (fisura circunferencial) que permite a los componentes operar durante un periodo mínimo de 25 años. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Máximo tamaño de fisura para que $t > 25$ años (fisuras circunferenciales)

Máximo tamaño de fisura	Reheater	Superheater	Superheater
	2.90 mm	46 mm	56 mm
	2.75 mm	2.4 mm	

Los valores obtenidos son sensiblemente mayores que los considerados en la hipótesis de longitud de fisura más pesimista o conservadora, que consideraba que las mayores fisuras existentes son iguales a las observadas

en los fallos producidos con anterioridad (que no son mayores de 2mm).

Mas aún, todos los cálculos realizados consideran que la central trabaja durante todas y cada una de las horas del año, es decir, 8760 h/año. Sin embargo, una estimación mucho más realista sería considerar un tiempo de operación de 6500 h/año, hipótesis que daría resultados aún más favorables desde el punto de vista de la duración de los componentes.

6. CONCLUSIONES

Tal como concluyeron los informes previos, los fallos se produjeron debido a un proceso de FIH en un material insuficientemente tratado tras el proceso de soldadura, lo que le hizo muy susceptible ante este fenómeno.

La cuestión fundamental es si en la estructura actual existen fisuras y, si las hay, en qué cantidad y cómo afectarán a la vida de la planta.

Tras el estudio realizado se puede afirmar que es muy razonable que no haya fisuras en los tubos o que, de haberlas, sean muy pocas o de pequeño tamaño, que no progresaron en el proceso de FIH. Es decir, la hipótesis de que haya gran cantidad de tubos fisurados no parece muy razonable y es altamente improbable, aunque tampoco se han encontrado pruebas que permitan descartarlo con absoluta certeza.

Desechado el poder afirmar la no existencia de fisuras se hace necesario realizar un estudio de integridad estructural.

En el caso de que haya fisuras se han razonado una serie de hipótesis con respecto a sus longitudes y geometrías, desde la más realista basada en la FIH hasta la más pesimista en función de las fisuras observadas en las roturas producidas previamente. Con la información suministrada por el cliente acerca de las tensiones actuantes en los distintos componentes se puede aseverar que en caso de haber fisuras, al estar limitado su tamaño, el correcto funcionamiento de la central no se va a ver comprometido.

En definitiva el estudio muestra como la aplicación de las técnicas de integridad estructural pueden servir para demostrar el correcto funcionamiento de componentes cuya fiabilidad es en principio dudosa, evitando de esta manera sustituciones o reparaciones innecesarias y por lo tanto, permitiendo ahorros económicos de importante cuantía.

7. REFERENCIAS

[1] F. Gutiérrez-Solana, J.A. Álvarez, A.M.Brass, J. Chêne, L. Coudreuse, M.A. Astiz, C. Renaudin, J.

Belzunce and J.J. González: “*Stress Corrosion Cracking on Weldable Microalloyed Steels*”, ECSC Contract nº 92.F2 11a 7210, Final Report, April 1996.

- [2] F. Gutiérrez-Solana, J.J. González, M.V. Biezma, A.M. Brass, M.A. Astiz, J. Chêne and J.M. Varona: “*Modelización de la Corrosión Bajo Tensión en aceros de baja aleación*”, ECSC Contract nº 7210-SA-901 (F5.7/87), Final Report, March 1991.
- [3] F. Gutiérrez-Solana, A. Valiente, J.J. González and J.M. Varona: *Metall. Trans. A*, Vol. 27A, 1996, pp. 291-304.
- [4] F. Gutiérrez-Solana, C. Takamodate, I.M. Bernstein and A.W. Thompson: *Metall. Trans. A*, vol 18A, 1987, pp. 1023-1028.
- [5] R. Kerr, F. Gutiérrez-Solana, I.M. Bernstein and A.W. Thompson: *Metall. Trans. A*, vol 18A, 1987, pp. 1011-1022.
- [6] J.J. González: Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 1987.
- [7] “*R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures*”, British Energy Generation, Issue 3, June 2003.
- [8] “*SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry*”, Brite-Euram Project No. BE95-1426, Contract No. BRPR-CT95-0024, Final Report, September 1999.
- [9] “*SAQ: A Procedure for Safety Assessment of Components With Cracks-Handbook*”, SA/FoU-Report 91/01, December 1991.