

ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES EN MECÁNICA DE FRACTURA DE UNIONES SOLDADAS

J.C. Suárez ^{*(1)}, F. López ^{**} y F. Molleda ^{*}

* E.T.S. Ingenieros Navales, Dpto. de Arquitectura y Construcción Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

** Escuela Politécnica Superior del Ejército. C/ Joaquín Costa 6, 28002 Madrid

(1) En la actualidad, en el Instituto Japonés de Investigación en Soldadura (JWRI), División de Elasticidad y Plasticidad. Universidad de Osaka, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567. Japón.

RESUMEN. La Mecánica de Fractura fue desarrollada originalmente para su aplicación al análisis de los procesos de fallo en materiales homogéneos. Sin embargo, la presencia de uniones soldadas en todo tipo de estructuras exige el empleo de ensayos estándares para la determinación de la tenacidad de fractura en materiales que, debido al ciclo térmico aplicado, son altamente heterogéneos. Se presenta una discusión de los problemas específicos que conlleva la aplicación de la Mecánica de Fractura en Uniones Soldadas, tales como la presencia de tensiones residuales y distorsión, los gradientes microestructurales y el mismatch del metal de aporte. Se consideran, asimismo, las necesidades de investigación futuras y la prioridad que cada problema concreto recibe por parte de los investigadores en este campo.

ABSTRACT. Fracture Mechanics was originally developed to predict some of the fracture processes for homogeneous materials. Nevertheless, weldments are unavoidably present in all kinds of structures and fracture toughness standard test are usually applied to materials that, due to the weld thermal cycle, are highly inhomogeneous. A discussion about specific problems of Fracture Mechanics of Welded Joints is included, considering subjects such as distortion and residual stresses, microstructural gradients and weld metal mismatch. Research needs are identified and priority of research issues assigned as considered by researchers in that field.

1. INTRODUCCIÓN.

La unión de componentes mediante técnicas de soldadura puede suponer hasta el 60% del tiempo de fabricación en ciertas industrias pesadas. Sin embargo, es virtualmente imposible obtener soldaduras libres de defectos. La unión soldada, en el conjunto de una estructura, es un lugar proclive a la presencia de defectos y discontinuidades. La necesidad de evaluar la severidad de los defectos y su efecto sobre la vida en servicio de la estructura es de la mayor transcendencia. La Mecánica de Fractura es una herramienta insustituible en el análisis de los procesos de fallo en todo tipo de materiales. Concretamente, dentro del campo de las uniones soldadas se usa desde hace muchos años con distintos propósitos: selección de materiales, como requerimiento para la aceptación o rechazo, desarrollo de procedimientos de soldadura y, fundamentalmente, predecir la rotura en uniones estructurales. Cuando se trata de materiales homogéneos, el desarrollo actual de la Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (MFEP) permite la predicción de muchos de los procesos de fallo que realmente ocurren. Sin embargo, la vida en servicio de las estructuras no suele venir limitada por el comportamiento de los materiales homogéneos que la integran sino, generalmente, por el de las

heterogeneidades causadas en el material por el proceso de soldadura. Los elevados gradientes térmicos a los que se somete al material dan como resultado una serie de problemas, asociados al comportamiento a fractura de la unión, que no son experimentados por los materiales homogéneos. Se pueden citar, entre otros: las tensiones residuales y distorsión, el mismatch o diferencia de propiedades mecánicas entre el material de aporte y el material base, los gradientes microestructurales y de propiedades mecánicas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), etc. Por otra parte, los ensayos estándares para la determinación de las propiedades a fractura (BS 5762, ASTM 1290, ESIS P2) han sido desarrollados originalmente para medir tales propiedades en materiales homogéneos, donde no existen los problemas específicos a los que antes nos hemos referido. Es lógico, pues, preguntarse sobre la aplicabilidad de estos ensayos a la caracterización de las uniones soldadas (1).

A iniciativa del Departamento de Energía de los EE.UU (Oficina de Ciencias Básicas de la Energía, División de Ciencia e Ingeniería de Materiales y Geociencias) y del Instituto de Investigación en Energía Eléctrica, se promovieron a finales de 1992 unas sesiones de trabajo sobre el tema: "Integridad estructural y su limitación por la fractura de

uniones soldadas". Representantes de la industria, universidades, laboratorios nacionales e institutos de soldadura discutieron sobre el estado del arte del problema y las necesidades de investigaciones futuras (2). El área de atención prioritaria es, sin duda, la evaluación de los efectos causados por una discontinuidad sobre la integridad estructural. Si se es capaz de evaluar esto, se estarán poniendo las bases para el desarrollo del concepto de adecuación al servicio (fitness-for-service) en la evaluación de las discontinuidades. Esto se traduciría en unos criterios para establecer los tamaños permisibles de grieta en función de su potencialidad para degradar la integridad estructural. Cómo lograrlo, definiendo los problemas que se presentan, los avances que se han logrado y las prioridades en investigación que se precisan, son los temas que se pretenden recoger en la presente comunicación.

2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA EN UNIONES SOLDADAS.

2.1 Problemas de la industria.

En la mayoría de las industrias pesadas (construcción naval, plataformas offshore, plantas generadoras de energía eléctrica, oleoductos y gaseoductos, etc.) la soldadura representa una importante partida en el montante total del tiempo y costes de fabricación y mantenimiento. Por ejemplo, en la construcción del casco de un barco la soldadura puede representar hasta el 60% del tiempo de fabricación; en una planta de generación eléctrica con combustible fósil, la soldadura supone el 10% de los costes de construcción y el 20% de los gastos de mantenimiento.

Algunos problemas específicos identificados por las distintas industrias son :

* Necesidad de ensayos para establecer criterios de homologación de materiales y procedimientos de soldadura. En la actualidad, uno de los ensayos utilizados es el CTOD, sin embargo, se sabe que sólo un 20% cumple estrictamente los requerimientos de la norma (3).

* Muchos de los códigos de aceptación y rechazo de defectos en uniones soldadas están basados únicamente en criterios de habilidad manual (cualificación del soldador). Criterios con una base más científica permitirían modificar los requerimientos de inspección no destructiva, reducir las reparaciones o, al menos, postponerlas sin comprometer la seguridad de la estructura.

* Las metodologías basadas en criterios de

adecuación al servicio de las que existe una amplia gama y que, por cierto, van desde las muy conservativas a las no conservativas, son, por lo general, situaciones inaceptables o, al menos, no satisfactorias. Estas metodologías permiten únicamente clasificar la estructura como segura o insegura, pero no facilitan las herramientas adecuadas para abordar en toda su extensión los procesos de fractura. Posteriormente se han incorporado algunos procedimientos basados en la Mecánica de Fractura, pero siempre asumiendo conceptos desarrollados originalmente para materiales homogéneos.

* La creciente tendencia a utilizar el material más adecuado para cada aplicación ha hecho que se incremente notablemente el número de uniones disimilares. Los fallos ocurren generalmente en la unión soldada y es preciso proponer una metodología específica para abordar tales problemas (uniones bimetálicas, metal-cerámico, etc.).

Todos los problemas mencionados habrá que enfocarlos prestando atención a los tres problemas básicos asociados con el comportamiento a fractura de las uniones soldadas: las tensiones residuales y distorsión, las variaciones microestructurales en la ZAC y el mismatch del metal de aporte.

2.2 Tensiones residuales.

Existen diversos métodos para tomar en consideración las tensiones residuales que existen en toda unión soldada. En ocasiones simplemente se ignoran o, en el mejor de los casos, se adoptan suposiciones tan simplificadoras que los resultados obtenidos en los ensayos de Mecánica de Fractura Elasto-plástica (CTOD, J) muestran una amplia dispersión. Se asume, por lo general, que las tensiones residuales son constantes en todo el espesor del material y tienen que ser añadidas a las tensiones introducidas durante el ensayo para determinar la tenacidad. Sin embargo, en uniones de gran espesor las tensiones residuales transversales, en el centro de la chapa, son de compresión, y la concentración de tensiones frente al vértice de grieta es, por tanto, mucho menos severa que lo estimado. Otra circunstancia donde las tensiones residuales son transcendentales es en el crecimiento subcrítico de grietas, bien sea por fatiga o por corrosión bajo tensión.

Es difícil la medida de la distribución tridimensional de las tensiones residuales en planchas de gran espesor. Actualmente, se han desarrollado algunos métodos que partiendo de unas cuantas medidas experimentales y apoyándose en el Método de los Elementos Finitos (MEF) son capaces de predecir el estado de tensiones

residuales en todo el espesor de la plancha (4). La segunda aproximación al problema consiste en el uso de fórmulas simples basadas en la recopilación de datos experimentales. El tercer método es el análisis termo elasto-plástico mediante el MEF. Es el procedimiento más potente, pero la simulación numérica requiere una modelización racional del fenómeno (5).

2.3 Mismatch del metal de aporte.

Un tema que está todavía sin resolver y que desempeña un papel fundamental en el desarrollo de modelos del comportamiento a fractura de uniones soldadas es el mismatch del metal de aporte. En uniones soldadas se pueden dar tres situaciones:

1. Las propiedades a tracción del metal base y de aportación son iguales (evenmatch).
2. Las propiedades son mayores en el metal de aportación que en el metal base (overmatch).
3. Las propiedades en el metal de aportación son menores que en el metal base (undermatch).

El significado de esta diferencia de propiedades mecánicas y su influencia sobre cómo se desarrolla la zona plástica en el frente de grieta, y cómo esto modifica la relación entre la carga aplicada y la fuerza impulsora para la propagación de la grieta, es en la actualidad un campo de investigación activa (6-10).

Adicionalmente, el problema del mismatch se agrava en una situación extrema pero cada día más utilizada en soldadura: las uniones bimetálicas. Con objeto de aprovechar las propiedades específicas de cada material, es frecuente unir dos materiales (no necesariamente metálicos) con propiedades muy dispares. La evaluación del comportamiento a fractura de este tipo de uniones constituye en sí mismo un subcampo dentro de la Mecánica de Fractura en Uniones Soldadas (11-14). Algunos estudios indican que la integral J por sí sola puede no ser suficiente para caracterizar el proceso de fractura cuando una grieta está situada en la intercara de una unión entre dos materiales distintos (1).

2.4 Gradiente microestructural.

La variación de la microestructura dentro de la ZAC, y en consecuencia de las propiedades mecánicas, da lugar a varios problemas difíciles de abordar cuando se pretende evaluar la tenacidad de una unión soldada. Es inevitable que el frente de grieta muestree distintas zonas de la ZAC (distintos "materiales" podríamos decir). La medida final, por tanto, de tenacidad es una especie de valor

promedio, que no representa una propiedad de la unión. Esto da lugar a una considerable dispersión de los resultados experimentales, lo que lamentablemente se suele traducir en que los ensayos se quedan reducidos a una simple prueba pasa/no pasa, viéndose despojados de gran parte de su valor cuantitativo.

El problema se puede agravar por la presencia, en algunos materiales, de Zonas Localmente Frágiles (ZLF). El resultado de un ensayo, por ejemplo el CTOD, se ve substancialmente afectado dependiendo del porcentaje de ZLF muestreada por el frente de grieta y queda enmascarada cualquier influencia debida a, por ejemplo, la utilización de distintas condiciones de soldadura (15-17). Por tanto, el problema tiene una naturaleza fundamentalmente probabilística, lo cual obliga al uso de técnicas especiales para la interpretación y análisis de los resultados. Podemos citar el uso de medidas locales del CTOD justo en el vértice de grieta, en las superficies laterales de la probeta, lo que evita el inferir el CTOD a partir de medidas remotas en el inicio de la entalla mecanizada (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD) (14). Asimismo, se han utilizado valores del CTOD modificados en función del crecimiento estable de grieta para cada ensayo (18-20). Esta técnica se basa en la asunción de que la extensión del crecimiento estable de grieta es una función de la microestructura que está siendo muestreada por el frente de grieta. La idea es redefinir el valor del CTOD medido en función de la diferencia entre el crecimiento estable del ensayo y un crecimiento estable de referencia (una microestructura muestreada de referencia). De esta manera se obvia la dispersión debida a las diferentes microestructuras muestreadas y se ponen de manifiesto otras dependencias normalmente ocultas, lo que resulta en un agrupamiento de los resultados de los ensayos.

3. NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

3.1 Técnicas de ensayo.

Los ensayos estándares aplicados a uniones soldadas deberían incluir métodos más adecuados para estimar la componente plástica del CTOD, a partir de medidas locales tomadas en las proximidades del vértice de grieta o mediante medidas de los desplazamientos en la boca de la entalla (CMOD). También se deberán desarrollar aún más las metodologías sugeridas en la actualidad para el preagrietamiento por fatiga, e incluso buscar las bases para nuevas aproximaciones.

Es necesario, asimismo, examinar los criterios de

aceptación y rechazo de los ensayos.

Para un correcto análisis de los resultados, es necesario: conocer la magnitud y orientación de las tensiones residuales, el efecto del mismatch y la variación de propiedades mecánicas en la ZAC.

Sería interesante y muy útil desarrollar procedimientos para realizar ensayos en probetas estándares más pequeñas. El límite inferior estaría de alguna manera impuesto por la cantidad mínima de microestructura que tiene que ser muestreado por el frente de grieta.

3.2 Adecuación al servicio.

Los criterios de calificación de procedimientos de soldadura en la fase de preproducción, como la mínima tenacidad admisible para homologar un procedimiento o el porcentaje de ZAC que ha de muestrear el frente de grieta, han de estar fundamentados en análisis de adecuación al servicio.

Se precisa un conocimiento más profundo de cómo las reparaciones afectan a las características a fractura de la unión, del efecto de los tratamientos térmicos de postsoldeo sobre la integridad de las uniones. En este último caso, la Mecánica de Fractura puede ayudar a establecer procedimientos de soldadura, tratamientos térmicos, etc, que permitan asegurar la tenacidad de fractura requerida para estas reparaciones.

La utilización de cámaras o simuladores de soldadura se ha mostrado extremadamente útil, debido al estrecho control sobre todos los parámetros (21). Sin embargo, es difícil predecir la integridad de componentes estructurales a partir de datos obtenidos con probetas pequeñas, por tanto, el empleo de probetas pequeñas requiere, además, información obtenida a partir de soldaduras reales. De esta manera se podrán desarrollar bases de datos que recojan la influencia de distintos factores.

3.3 Crecimiento subcrítico.

Las especiales circunstancias que rodean a una unión soldada hacen que la aplicación de la Mecánica de Fractura no sea tan inmediata como sería deseable. Las características microestructurales juegan un papel determinante en el crecimiento subcrítico de grietas por fatiga. Esto es cierto para grietas muy pequeñas, del orden de los elementos microestructurales característicos. En estas circunstancias, la MFEL no es aplicable, y tampoco lo es la MFEP; el proceso de crecimiento subcrítico ha de ser definido en términos de la Mecánica de

Fractura Microestructural (MFM) (22). La velocidad de crecimiento de estas grietas y las tensiones por debajo de las cuales no hay propagación, así como el crecimiento y parada por barreras microestructurales, no puede ser descrito en términos de una mecánica del continuo y depende fuertemente de las características microestructurales (23).

Dentro de la ZAC, a medida que la grieta crece por fatiga, la influencia de la microestructura va siendo cada vez menos importante. De manera que, en una soldadura, el comportamiento de las fisuras subcríticas y la teoría que puede ser utilizada para describirlo varía a medida que la grieta avanza por la unión. En estas condiciones, las predicciones sobre la vida estimada de uniones soldadas no son tan fiables como sus equivalentes en materiales homogéneos.

Por todo ello, en la actualidad, la evaluación de las discontinuidades de las soldaduras en cuanto a su comportamiento a fatiga dista mucho de ser un tema cerrado y con un tratamiento satisfactorio. Es habitual utilizar aproximaciones semi-empíricas, basarse en curvas S-N o, a lo sumo, tomar relaciones de crecimiento de grietas por fatiga, según la ley de Paris, representativas de todo un grupo de materiales (24). En cualquier caso, estas generalizaciones han de ser forzadamente para colocarse del lado de la seguridad.

Los objetivos de investigación en este campo se centran en el desarrollo de modelos que predigan el crecimiento subcrítico de grietas (por fatiga o fluencia) en condiciones medioambientales agresivas y tomando en cuenta las tensiones residuales. Asimismo, es necesario el mejorar la comprensión del papel que juegan los distintos parámetros de soldeo y la química del material sobre la susceptibilidad al crecimiento subcrítico.

3.4 Prioridades de investigación.

Todos los temas sobre Mecánica de Fractura en Uniones Soldadas a que nos hemos referido, que se investigan o están pendientes de investigación, pueden ser agrupados según tres criterios: etapas del proceso de fractura (inicio de la propagación, crecimiento estable, fallo), escala mecánica (propiedades mecánicas, micromecánica, continuo), herramientas de investigación (numérica, experimental, modelos). Atendiendo a la opinión de los expertos americanos (2) hay una serie de temas que requieren atención inmediata.

La prioridad máxima se centra en la medida experimental de la tenacidad de fractura en uniones



soldadas. Es necesario desarrollar métodos de ensayo para determinar la tenacidad de fractura local, en aquellas regiones donde presente un valor mínimo y que, por tanto, controlen la etapa de iniciación de la propagación de la grieta en la soldadura.

En un segundo nivel de prioridad se encuentra la investigación de micromecanismos de fractura. Esto conducirá a una mejor comprensión de cómo el daño a nivel microscópico evoluciona y se traduce en un daño significativo a nivel macroscópico.

En tercer lugar, aunque relacionado con las dos prioridades anteriores, se sitúan los aspectos de mecánica del continuo. Especialmente interesante es la investigación sobre el modo en que las diferencias en propiedades mecánicas (material de aporte-ZAC, ZAC, ZAC-material base) afecta al comportamiento a fractura de la unión.

Con la menor prioridad, sobre todo por la complejidad de su tratamiento más que por el interés del problema, se sitúan todos los aspectos relacionados con el crecimiento estable de grietas. En último lugar queda el proceso de fallo último o catastrófico de la unión.

4. CONCLUSIONES.

* La aplicación de la Mecánica de Fractura al estudio de los procesos de fallo en uniones soldadas viene condicionada por la existencia de ciertos problemas específicos, no experimentados por los materiales homogéneos, como son: distorsión y tensiones residuales, mismatch del metal de aporte y gradientes microestructurales.

* Se precisa acentuar la investigación en ciertos aspectos. En cuanto a las técnicas de ensayo se refiere, se necesita incluir las tensiones residuales de soldadura para un correcto análisis de los resultados, el efecto del mismatch debe ser clarificado y es necesario un método consistente de tratar los gradientes microestructurales. El objetivo último es poder determinar la tenacidad localmente, para poder establecer el eslabón más débil en toda la unión soldada.

* Otro campo donde se deben centrar los esfuerzos de investigación es en el estudio de los micromecanismos de fractura. El ciclo térmico de soldeo y los tratamientos de postsoldo modifican la microestructura del material. La aparición de zonas localmente frágiles provoca la acumulación de daño a nivel microscópico. Se precisa saber bajo qué condiciones dicho daño evoluciona y se manifiesta macroscópicamente.

* La investigación sobre el crecimiento de grietas subcríticas en uniones soldadas, aunque de indudable interés práctico, todavía está muy lejos de estar a la misma altura que en el caso de materiales homogéneos. Al progresar la grieta, atraviesa distintas microestructuras y la influencia de éstas sobre la velocidad de propagación se ve, asimismo, modificada en cada instante. No se dispone aún de un modelo coherente capaz de hacer predicciones válidas.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- (1) S.M.Graham, W.G.Reuter, W.R.Lloyd, J.S.Epstein, The validity of standard test methods for characterizing weld fracture, Transactions of the ASME. J. of OMAE. Feb. 1992, Vol. 114, pp. 16-21.
- (2) D.W.Keefer, W.G.Reuter, H.B.Smarrt, J.A.Johnson, S.A.David, Needed: verified models to predict the fracture of weldmenst, Welding Journal, Sep. 1993, pp. 73-79.
- (3) M.F.Guittos, R.E.Dolby, Predicting the HAZ toughness of C and C-Mn steels welding at 2kJ/mm, Welding Res. Int., 9, 1979, pp. 22-54.
- (4) Y.Ueda, K.Fukuda, New measuring method of three-dimensional residual stresses in long welded joints using inherent strains as parameters- Lz method-, Trans. of the ASME. J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, 1989, pp. 1-8.
- (5) Y.Ueda, K.Nakacho, M.Yuan, Application of FEM to theoretical analysis, measurement and prediction of welding residual stresses, Trans. of JWRL. Vol. 20, N° 1, 1991, pp. 97-107.
- (6) M.Toyoda (Ed.), Strength mismatching and its control, Proc. of the Workshop, Tokyo, Japón, Jul. 1992, IIW-Doc, X-1254-92.
- (7) M.Toyoda (Ed.), Constraint effects on the structural performance of welded joints, Pro. of the 2nd Workshop, Osaka, Japón, Sep. 1994, IIW-Doc. X-1300-94.
- (8) M.KoÇac, M.Es-Souni, L.Chen, K.H.Schwalbe, Microstructure and weld metal matching effects on Heat Affected Zone toughness, Pro. of the 8th Int. Conf. OMAE-ASME. La Haya, Holanda, Marzo 19-23, 1989, pp. 623-633.
- (9) P.Dong, J.R.Gordon, the effect of under and overmatching on fracture prediction models, Pro. of the Int. Conf., Welding 90, GFSS, Geesthacht, Alemania, Oct. 1990, pp. 363-370.
- (10) B.Petrovski, M.KoÇac, S.Sedmack, Fracture behaviour of undermatched weld joint with short surface crack, Proc. of the 10th Int. Conf. OMAE-ASME, Stavanger, Noruega, Jun. 23-28, 1991, pp. 101-107.

- (11) H.C. Cao, A.G. Evans, An experimental study of the fracture resistance of bimaterial interfaces, *Mechanics of Materials*, 7, 1989, pp. 295-304.
- (12) C.F. Shih, R.J. Asaro, N.P. O'Dowd, Crack on biomaterial interfaces: plasticity aspects, *Scripta Metall. Conf. on Bonding, Structural and Mechanical Properties*, New York, EEUU, 1990, pp. 313-325.
- (13) J.X. Zhang et al., Studies on the fracture mechanics parameters of weldment with mechanical heterogeneity, *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 34, N° 5/6, 1989, pp. 1041-1050.
- (14) M. Koçac, E. Junghans, Fracture toughness properties of similar and dissimilar electron beam welds, *Eurojoin 2, Sec. Eur. Conf. on Joining Tech.*, Florencia, Italia, Mayo 16-18, 1994, pp. 259-270.
- (15) M. Toyoda, Fracture toughness evaluation of steel welds. A review, Osaka University, Japón, 1986.
- (16) M. Toyoda, Fracture toughness evaluation of steel welds. Review Part II, Osaka University, Japón, 1989.
- (17) L. Devillers, D. Kaplan, P. Testard, An approach to predict microstructures and toughness properties in heat affected zones of multipass welds of structural steels, *Welding in the World*, Vol. 31, N° 4, 1993, pp. 256-267.
- (18) J.C. Suárez, F. Molleda, R. González, R. Jiménez, Efecto de la microestructura de la ZAC en el análisis de resultados de ensayos CTOD en uniones soldadas de aceros HSLA para plataformas offshore, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 10, 1993.
- (19) J.C. Suárez, F. Molleda, R. González, R. Jiménez, Approach to CTOD data analysis based on microstructure of HAZ in HSLA steel for offshore applications, *Sec. Eur. Conf. in Joining Tech. Eurojoin 2*, Florencia, Italia, 16-18 Mayo, 1994.
- (20) J.C. Suárez, F. Molleda, R. González, R. Jiménez, Correlation of modified crack tip opening distance with heat input to the heat affected zone of high-strength low alloy steels, *Theoretical and applied Frac. Mech.*, 21, 1994, pp. 17-22.
- (21) G. Barajas, F. López, J.C. Suárez, On the grain growth behaviour in the HAZ of Al-5083, *Sec. Eur. Conf. in joining Tech., Eurojoin 2*, Florencia, Italia, 16-18 Mayo, 1994.
- (22) K.J. Miller, materials science perspective of metal fatigue resistance, *Anales de Mec. de Frac.* Vol. 12, 1995, pp. 1-10.
- (23) J.C. Suárez, F. Molleda, R. González, R. Jiménez, Comportamiento a fractura de constituyentes microestructurales de baja tenacidad en la ZAC intercrítica de uniones soldadas de un acero HSLA para plataformas offshore, *Ana. de Mec. de Frac.*, Vol. 11, 1994.
- (24) S.J. Maddox, Recent advances in the fatigue assessment of weld imperfections, *Welding Journal*, Julio, 1993, pp. 42-51.