

ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL DE ACERO COLADO UTILIZADO EN UN PUENTE ATIRANTADO.

J. Terán-Guillén¹, S. Cicero², T. García², J.A. Alvarez², M. Martínez-Madrid¹ and J.T. Pérez-Quiroz¹.

¹Instituto Mexicano del Transporte

Km. 12 Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila

Querétaro, CP 076700. México

E-mail: Jorge.Teran@imt.mx

²Universidad de Cantabria.

Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, Av Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria

E-mail: sergio.cicero@unican.es

RESUMEN

Se presenta la evaluación de la integridad estructural, mediante diagramas de fallo, de 112 anclajes fabricados con acero colado y utilizados en un puente atirantado. Uno de los anclajes había sufrido un fallo y en multitud de ellos se detectaron defectos no planos. Para el desarrollo de los diagramas de evaluación se consideró una fisura elíptica superficial con tres parámetros geométricos distintos. Además, una fisura elíptica embebida y una fisura elíptica superficial, éstas dos últimas de acuerdo a los defectos encontrados en el material. Se utilizaron dos condiciones de carga: incremento de flujo vehicular simulado a 30 años con un incremento anualizado del 6% y las cargas que se producen por el peso de 4 tractocamiones que están a la mitad del puente. Se determinaron las propiedades en tracción del acero de acuerdo a la norma ASTM E-8 y la tenacidad a la fractura se obtuvo según el procedimiento de la norma ASTM E-1820. Cuando se aplica la carga de servicio simulado a 30 años, los diagramas de fallo muestran que las diferentes tipos de grieta analizados caen en la zona segura del diagrama, y en una condición insegura con las cargas de los 4 tractocamiones. Se concluye que el componente estructural estudiado podrá operar de una manera segura siempre y cuando las cargas aplicadas no alcancen las 974 ton producidas por el peso de los 4 tractocamiones.

PALABRAS CLAVE: Acero colado, Entalla, Tenacidad a la fractura, Diagramas de evaluación de fallo.

ABSTRACT

This paper presents the structural integrity assessment of a cast steel upper anchorage element of a cable stayed bridge by using failure assessment diagrams. The FAD analysis is performed by assuming a surface elliptical crack with three different aspect ratios; elliptical embedded crack and an elliptical surface crack are also considered, which represent the actual defect found in the material. Moreover, two loading conditions are considered as well. One caused by a 30 year forecast traffic conditions with a 6% per year increment, and secondly, loads produced by the total weight of four heavy trucks crossing in the middle of the cable stayed bridge. Material properties were obtained by using ASTM E-8(tensile) and ASTM 1820 (fracture) standards for both cracked and notched conditions, provided by regular traffic are only safe for the 30 year forecast loading assumptions, whereas working conditions are unsafe under 974 ton load applied by all four heavy vehicles

KEYWORDS: Cast steel, notch, fracture toughness, failure assessment diagrams.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de aceros colados para la construcción de puentes vehiculares conlleva una problemática de heterogeneidad en el material por el proceso intrínseco de fabricación, ya que si éste no se realiza de una manera adecuada, el material tendrá defectos tales como poros, inclusiones y cavidades que afectaran la integridad del componente.

En ese sentido, estudios realizados en un puente atirantado ubicado cerca del Golfo de México (Figura 1) han sido tema de mucho interés científico, por el hecho de que en el año 2000 presentó una falla en uno de sus 112 tirantes, y se concluyó que la falla fue debida a la baja tenacidad y a los tamaños de grano excesivos asociados a los defectos presentes en el material del anclaje superior donde se sujeta el tirante [1]. A partir de ese momento, se han realizado una serie de estudios para conocer las condiciones de integridad estructural del puente. Los estudios han abarcado desde el estudio de defectos del material por ultrasonidos [2], que dio lugar a la decisión de sustituir 20 anclajes de los 112, simulaciones por elementos finitos de las cargas aplicadas al puente [3], nuevas técnicas de detección de daño [4] y análisis probabilístico de integridad estructural [5].

Una característica estructural de los puentes es que están sometidos a cargas variables por la versatilidad en pesos y dimensiones del parque vehicular. Esto hace que los defectos de fabricación en el anclaje de acero colado jueguen un papel muy importante como consecuencia de la concentración de esfuerzos que provocan y que los convierte en sitios preferenciales de inicio de crecimiento de grieta. Una de las maneras de simular el efecto de los concentradores de esfuerzos es ensayar probetas de fractura entalladas que permiten relacionar el radio de la entalla con la capacidad resistente a fractura del material. Las probetas con entalla se pueden estudiar, además, en términos de la teoría de las distancia críticas para conocer el efecto que puede tener las entallas de diferente tamaño en el comportamiento a la fractura [6,7].

Por otra parte, los diagramas de fallo (FAD, por sus siglas en inglés) son una herramienta ingenieril que posibilita visualizar la interrelación entre la fractura y el colapso plástico con base a dos parámetros adimensionales, K_r y L_r , que dependen de las propiedades mecánicas y de fractura [8]. Esta herramienta permitirá evaluar el comportamiento del anclaje analizado bajo las condiciones de carga existentes en el puente y estimar si el componente operara de manera segura o insegura.

Con todo ello, el objetivo principal de este trabajo es determinar los tamaños críticos de defectos en los anclajes analizados. Dichos tamaños podían compararse con las dimensiones de los defectos encontrados en las

inspecciones realizadas en la estructura, determinando así la necesidad o no de tomar las medidas correctoras.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

El material utilizado para la determinación de las propiedades mecánicas y de fractura fue tomado de uno de los anclajes del puente atirantado, Figura 2, el cual se seccionó para obtener probetas para los ensayos de tracción, para los ensayos de tenacidad a fractura, y para el análisis metalográfico.



Figura 1. Puente atirantado donde se obtuvo el anclaje.



Figura 2. Anclaje retirado de servicio para la obtención de las probetas de tracción, mecánica de fractura y metalografía.

2.2 Metalografía y composición química

La preparación de la muestra consistió en montaje con baquelita para una mejor manipulación. Después se pulió a espejo utilizando lijas desde el número 120 hasta 2000, y alúmina de $1\mu\text{m}$ hasta $0,05\mu\text{m}$. Posteriormente, la muestra pulida se atacó con nital al 2%. La observación se realizó en un microscopio metalográfico de platina invertida. La captura de las fotomicrografías se obtuvo con una cámara digital con el objetivo de 5X del microscopio.

2.2 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E-8 [9] en una máquina servohidráulica de 100kN. La geometría de la probeta se muestra en la Figura 3. Las pruebas se realizaron bajo control de carga a una velocidad de 0.108 kN/s.

2.3 Ensayos de resistencia fractura

Los ensayos se desarrollaron siguiendo la norma ASTM E-1820[10]. La geometría de las probetas que se seleccionó fueron probetas de flexión en tres puntos (SE(B) por sus siglas en inglés), Figura 3. Las dimensiones de las probetas fueron: espesor (B) de 15 mm, Ancho de la probeta (W), 30 mm. Así, un total de 30 probetas se dividieron en lotes de 5, y en cada lote se mecanizaron entallas con radios diferentes: 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm. Se consideró un radio igual a cero a las probetas preagrietadas por fatiga hasta una longitud de grieta $a = 0.50W$. Para medir la longitud de grieta se utilizó el método visual, que consiste en dibujar una línea a partir de la entalla y verificar, mediante microscopía óptica, que la grieta alcance la distancia seleccionada. Una vez que las probetas estuvieron preagrietadas, se aplicó una carga monotónica bajo control de desplazamiento hasta la rotura de la probeta, con una la velocidad de desplazamiento de 0.30 mm/min. Los otros lotes con radios de entalla distintos de cero no se preagrietaron, únicamente se procedió aplicarle la carga hasta la rotura.



Figura 3. Geometría de la probeta de tracción y flexión en tres puntos SE(B).

2.4 Diagramas de fallo

Para la evaluación de defectos, tanto fisuras como entallas, así como la interacción de cavidades detectadas en los anclajes se utilizaron los diagramas de evaluación de fallo de acuerdo al procedimiento y reglas de interacción de la BS7910-2005 [11], seleccionando la opción 3B para obtener la curva de evaluación de fallo:

Para $L_r \leq L_{rmax}$:

$$K_r = \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{L_r \sigma_Y} + \frac{L_r^3 \sigma_Y}{2E \varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} \quad (1)$$

para $L_r > L_{rmax}$, $K_r = 0$

Los defectos analizados fueron los siguientes:

- Grieta elíptica superficial postulada con tres razones geométricas: $a/2c = 0.2, 0.5$ y 1.0
- Grieta elíptica embebida, obtenida al considerar la interacción de dos defectos encontrados en el centro del material, con razón geométrica $a/2c = 0.295$ [11].
- Grieta elíptica superficial, donde la razón geométrica, $a/2c = 0.434$, obtenida a partir de la suposición de la interacción de defectos encontrados desde la superficie hasta el centro del material [11].

Se consideraron los siguientes escenarios:

- El 95% de confiabilidad del incremento de flujo vehicular simulado a 30 años con un incremento anualizado del 6%, que representa 337 ton (139.49 MPa) [4].
- De los 112 tirantes, la carga máxima que se origina cuando 4 tractocamiones están a la mitad del puente, que es de 974ton (403.04 MPa) [3].

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Metalografía y composición química

En la Tabla 1 se muestra el resultado del análisis químico del acero colado y en la Figura 4 se muestra la microestructura del material, fundamentalmente ferrítico-perlítica.

Tabla 1. Composición química del anclaje.

% en Peso	Anclaje EN20080912
C	0.34
Si	0.38
Mn	0.71
P	0.031
S	0.025
Cr	1.25
Mo	0.13
Ni	0.74
Cu	0.33

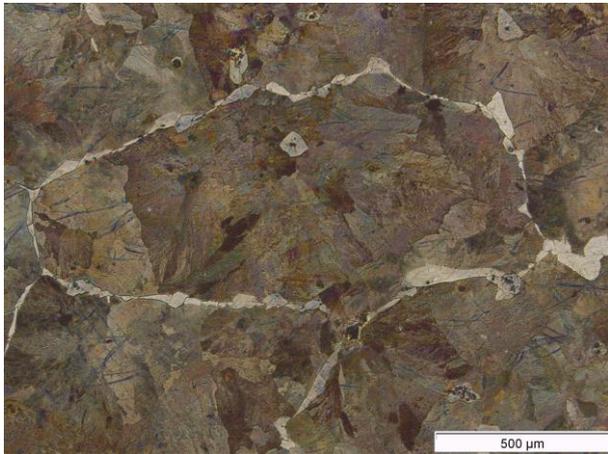


Figura 4. Microestructura de ferrita y perlita del acero con tamaño de grano grande.

3.2 Pruebas de tracción uniaxial

En la Tabla 2 se muestran los valores promedios, desviación estándar y porcentaje del coeficiente de variación de las propiedades mecánicas. De acuerdo con los resultados, el acero colado presenta en términos generales un coeficiente de variación menor del 10%, por lo que se puede considerar aceptables los ensayos de tracción. Por otro lado, el promedio del porcentaje de elongación es menor que el 10%, lo cual implicaría una tendencia a comportarse de una manera frágil, probablemente debido a un tamaño de grano grande, tal como se muestra en la Figura 4.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero.

25 Probetas	E (GPa)	σ_{YS} (MPa)	σ_U (MPa)	%e
Promedio	213	366.06	584.91	7.21
Desv. Estándar	7.89	12.74	32.72	0.59
% C.V:	3.70	4.36	5.59	8.20

3.3 Ensayos de resistencia a fractura

En la Tabla 3 se muestran los resultados de cada uno de los ensayos de fractura de las probetas entalladas. Los resultados de las probetas con radio cero se consideraron para determinar la tenacidad a la fractura. En la Tabla 4 se muestran el resumen de los resultados obtenidos, los cuales muestran que el valor más alto de tenacidad a la fractura se obtiene en las probetas con radio igual a 1.5 mm y la menor tenacidad se obtiene con las probetas preagrietadas con un radio de cero milímetros. También se nota que la mayor dispersión de esta propiedad se presenta con las probetas con radio de 0.5 mm y una menor dispersión con radio de 2.5 mm.

Tabla 3. Resultados de la tenacidad a la fractura de los especímenes con radios distintos de entalla.

Probeta	Radio de entalla (mm)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	K_{Ic} MPam ^{1/2}
1	0.0	11.07	68.93
2	0.0	10.05	49.62
6	0.0	12.64	63.48
7	0.0	10.98	74.99
9	0.0	15.02	99.28
12	0.5	23.44	98.77
13	0.5	10.20	51.56
14	0.5	11.25	143.43
15	0.5	10.15	86.576
16	0.5	13.17	192.37
17	1.0	11.57	74.80
18	1.0	11.47	76.13
19	1.0	11.24	56.40
20	1.0	10.62	58.49
23	1.0	15.74	98.77
24	1.5	12.48	87.95
25	1.5	12.72	98.55
26	1.5	15.25	164.53
29	1.5	13.45	97.50
30	1.5	14.30	206.54
32	2.0	12.90	99.19
33	2.0	14.27	122.77
34	2.0	12.80	95.26
35	2.0	13.06	91.67
36	2.0	11.16	56.66
37	2.5	13.34	101.38
38	2.5	15.58	141.73
39	2.5	13.27	101.06
40	2.5	12.94	88.67
41	2.5	13.45	87.30

Tabla 4. Resumen de los ensayos de resistencia a la fractura.

Número de Probeta	Radio de entalla (mm)	$P_{m\acute{a}x}$ Promedio (kN)	K_{Ic} Promedio (MPam ^{1/2})	Desv. Estándar	%CV
5	0	11.95	71.26	18.26	25.62
5	0.5	13.64	114.54	54.52	47.60
5	1.0	12.13	72.92	17.05	23.38
5	1.5	13.64	131.02	52.11	39.77
5	2.0	12.34	93.11	21.49	23.08
5	2.5	13.22	104.03	22.10	21.24

La Figura 5 recoge los resultados obtenidos. Se puede percibir como existe cierto efecto entalla, con una tendencia de la resistencia a fractura al tomar mayores valores a medida que aumenta el radio de entalla. Aunque, desde el punto de vista de la integridad estructural, es importante advertir que la dispersión experimental hace que para valores altos de radio de entalla se siguen obteniendo valores bajos de la resistencia a la fractura, propios de la condición fisurada del material. Por ello, en lo que sigue en este trabajo, no se va a considerar ningún efecto entalla, asumiendo que las entallas se comportan como fisuras.

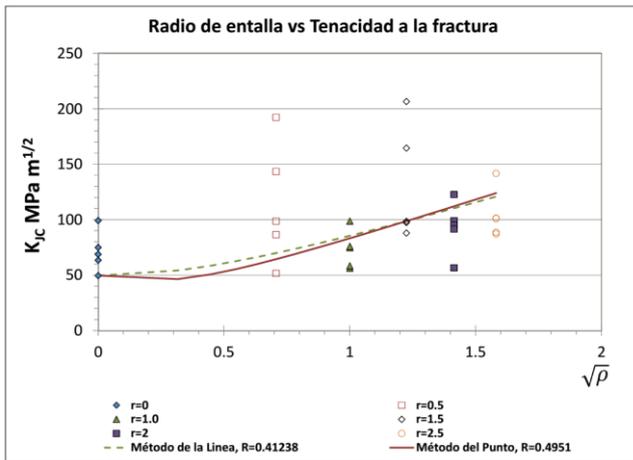


Figura 5.- Resultados de tenacidad a la fractura en función del radio de la entalla.

3.4 Análisis FAD

De la Figura 6 hasta la Figura 8 se muestran los diagramas de fallo de las distintas razones geométricas de las grietas analizadas, tanto la postulada como las obtenidas a partir de los defectos reales. La grieta postulada de longitud inicial de 14 mm fue estimada con base al promedio de las longitudes máximas de grietas superficiales, reportadas de la inspección de los componentes por ultrasonido y líquidos penetrantes [4]. La Figura 6 indica la menor longitud de grieta de 31 mm que se obtiene con una razón geométrica de $a/2c = 0.2$, siendo la condición más crítica que las otras razones, las cuales mostraron mayores longitudes de grieta.

También en la Figura 6 se advierte que los puntos (L_r, K_r) obtenidos en el diagrama con una carga de 337 ton, se encuentran por debajo (zona segura) de la curva de evaluación de fallo prevista por la ecuación 1, independientemente de la razón geométrica de la grieta. Cuando se incrementa la carga hasta 974 toneladas, por el contrario, los puntos (L_r, K_r) estarán por encima (zona no segura) de la curva de evaluación de fallo, indistintamente del valor de la razón geométrica presente.

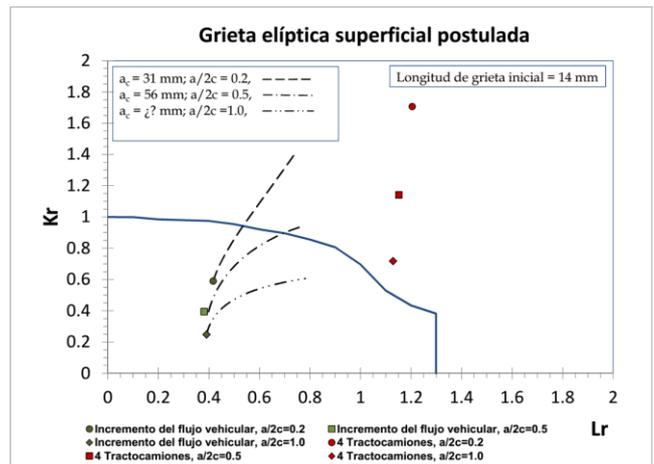


Figura 6.- Grieta elíptica superficial postulada con diferentes razones geométricas.

En la Figura 7 se analiza la interacción de dos defectos encontrados en zona interna del componente, esta interacción se simula como si fuera una grieta elíptica embebida, los resultados muestran que con el incremento del flujo vehicular el componente estará en la zona segura y en la zona insegura con la carga de los 4 tractocamiones.

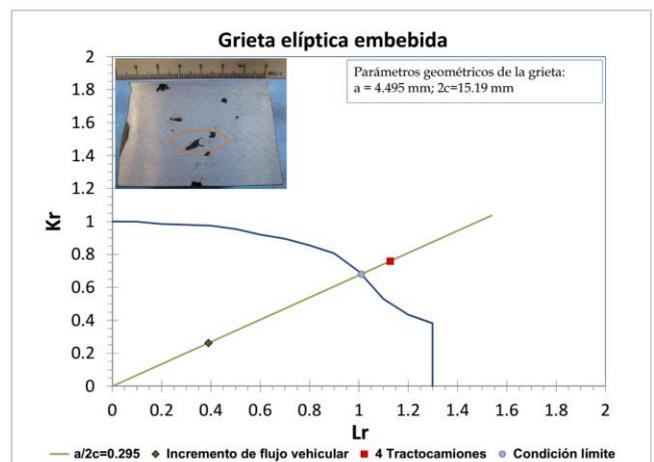


Figura 7.- Interacción de defectos en el centro del material, considerados como una grieta elíptica embebida.

La Figura 8 analiza la interacción de cavidades de diferentes tamaños encontradas en una probeta de ensayo, donde éstas se encuentran desde la superficie de la probeta hasta el centro de la misma. Se nota un comportamiento similar al de la Figura 7 en cuanto a las condiciones de carga, pero con la diferencia en la carga ($P_{límite}$) y el factor de intensidad de esfuerzos ($K_{límite}$) en la condición límite. Siendo $K_{límite}$ mas alto con una $P_{límite}$ menor para la grieta elíptica superficial.

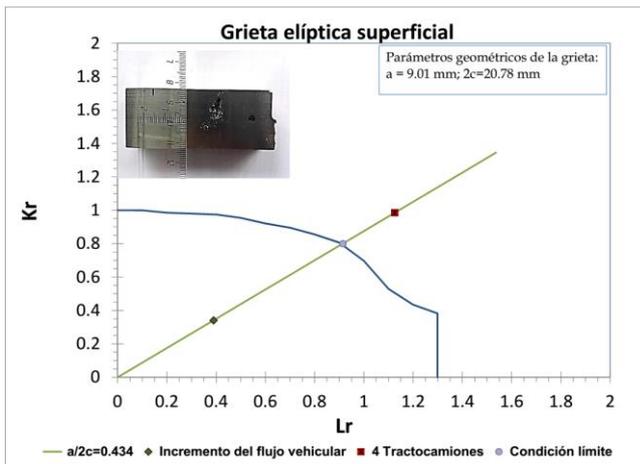


Figura 8.- Interacción de defectos desde la superficie al centro de la probeta, considerada como una grieta elíptica superficial.

Resumiendo en la Tabla 5 la información obtenida de los diagramas, se muestra que la razón geométrica de la grieta elíptica superficial postulada es mas severa con la razón de 0.2 y menos severa con 1.0. Con relación al análisis de los defectos encontrados en el material, resultó más severa la grieta elíptica superficial que la grieta elíptica embebida, no obstante de tener la mayor razón geométrica.

Tabla 5. Resultados de factores de reserva y condición límite: Carga ($P_{límite}$), Factor de intensidad de esfuerzos ($K_{límite}$).

Tipo de grieta	Razón geométrica	Factor de reserva	$P_{límite}$ (ton)	$K_{límite}$ (MPa $m^{1/2}$)
Elíptica superficial	0.2	1.55	521.56	45.26
postulada	0.5	2.11	712.01	41.44
	1.0	2.63	886.40	32.26
Elíptica embebida	0.295	2.61	878.47	33.74
Elíptica superficial	0.433	2.25	757.64	39.70

4. CONCLUSIONES

Las longitudes de grieta crítica dependen de la razón geométrica de la grieta a carga constante e implícitamente representa la severidad del defecto para producir el fallo del componente cuando menor es su longitud, siendo la mas severa la grieta elíptica superficial postulada con una razón geométrica de 0.2 y carga de 337ton.

Se observa una cierta tendencia a obtener valores de tenacidad a la fractura más altos cuando la entalla de la probeta es mayor, pero debido a la dispersión se enmascara esa tendencia, por lo que el análisis se realizó considerando los valores de tenacidad más bajos.

A pesar de un tamaño de grano grande y la presencia de defectos en el material como las cavidades, el componente operará de una manera segura para la condición del incremento de flujo vehicular con cargas

aplicadas de 337 ton, pero cuando la carga aplicada alcance las 974 ton debido al peso de los 4 tractocamiones, el componente trabajará de una manera insegura.

AGRADECIMIENTOS

Uno de los autores, Jorge Terán Guillén, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, por el apoyo brindado para la realización de la Estancia Sabática en la Universidad de Cantabria.

REFERENCIAS

- [1] Aguirre A., Carbajal J., *Análisis del tirante 11 del puente Papaloapan*, Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S.A. de C.V. Reporte Interno AF-IFT00087, Saltillo, Coahuila, México, 2000.
- [2] López J.A., Carrion F.J., Quintana J.A., Samayoa D., Orozco P.R., *Verification of the ultrasonic qualification for structural integrity of partially embedded steel elements*, Advances Materials Research, 65(2009), pp. 69-78, 2009.
- [3] Samoyoa Ochoa Didier, *Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados*. Tesis Doctoral, ESIME-IPN, México D.F. 2005.
- [4] Quintana Rodríguez Juan Antonio. *Análisis del método de búsqueda global para la detección de daño y monitoreo estructural de puentes*. Tesis Doctoral, ESIME-IPN. México D.F. 2009
- [5] Alcaraz Caracheo Luis Alejandro, *Análisis probabilístico de integridad de un anclaje de acero estructural*. Tesis Doctoral, ESIME-IPN. México D.F. 2012.
- [6] Cicero S., Madrazo V., Carrascal I.A., Cicero R., *Assessment of notched structural components using failure assesment diagrams and the theory of critical distances*. Engineering fracture mechanics 78 (2011) 2809-2825.
- [7] Cicero S., Madrazo V. , Carrascal I.A., Laporte M. *Evaluación de entallas mediante diagramas de fallo*. Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 2(2011).
- [8] Milne I., Ainswoth R.A., Dowling A.R., Stewart A.T. *Assessment of the integrity of structures containing defects*. Int. J. Press & Piping 32 (1988), 3-104.
- [9] E 8-04 *Standard test method for tension testing of metallic materials of Metallic Materials*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. O3.01. Easton, USA.
- [10] E 1820-06 *Standard test method for measurement of fracture toughness*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. O3.01. Easton, USA.
- [11] BS 7910:2005. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*.