

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PREFISURADOR DE PROBETAS TIPO FLEXIÓN EN TRES PUNTOS PARA DETERMINAR LA FRACTOTENACIDAD CTOD

### RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se diseñó y construyó un banco para generar fisuras por fatiga, para probetas del tipo flexión en tres puntos. Se hicieron ensayos de una platina de acero SAE 1045 laminado en caliente, se adaptaron los dispositivos que fueron necesarios para el momento en que se prefisuraron las probetas, entre los cuales se encuentran un contador de ciclos, una celda de carga y un microscopio óptico. Se estudió el avance del crecimiento de grieta, una vez se prefisuraron las probetas, se procedió a realizar el ensayo de fractoténacidad denominado Desplazamiento de Apertura de Grieta (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) bajo la Norma ASTM E1290.

**PALABRAS CLAVES:** Desplazamiento de abertura de grieta, acero, prefisuradora.

### ABSTRACT

*In this investigation project was designed and constructed an equipment to generate cracks by fatigue, for flexion in three points. The tests were realized on steel plate SAE 1045 hot laminate. The devices adapted necessary for the cracking test were: an accountant of cycles, a cell of load and an optical microscope, with which, the advance of the crack growth was observed. Therefore, the tests of crack tip opening displacement (CTOD) were realized. The displacement registers were taken in the end of the crack, as increases the load until the final fracture, for the test was used a machine of controlled load.*

**KEY WORDS:** crack tip opening displacement, steel, equipment to generate cracks.

### 1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de la fractura se soporta en el cálculo de esfuerzos y deformaciones alrededor de una grieta, los cuales provocan el desplazamiento relativo de las superficies de fractura en un cuerpo,  $K_I$  es un factor que cuantifica la intensidad de los esfuerzos alrededor de la punta de la grieta en función del esfuerzo nominal y el tamaño de la misma. Si en la punta de una grieta existe una zona plástica pequeña en la cual hay una concentración de esfuerzos elásticos, cuya intensidad es determinada por el factor de concentración de esfuerzos, se encuentra que, cuando  $K_I$  alcanza un valor crítico  $K_C$  se presenta un crecimiento de grieta rápido e inestable.  $K_C$  es conocido como tenacidad a la fractura.

La extensión de la componente de deformación en la dirección normal al plano de fractura es llamada desplazamiento de abertura de grieta o CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) y depende básicamente de la magnitud de los esfuerzos en la punta de la grieta. Cuando el CTOD del material alcanza una dimensión crítica CTOD<sub>c</sub> se presenta propagación inestable de la

### OSCAR ANDRÉS HINESTROZA

Ingeniero Mecánico  
Grupo de Investigación en  
Mejoramiento Industrial  
Universidad del Valle  
oscar100x100to@yahoo.es

### JOHN SANDRO RIVAS

Ingeniero Mecánico, Estudiante de la  
Maestría en Ingeniería Mecánica.  
Grupo de Investigación en  
Mejoramiento Industrial  
Universidad del Valle. Escuela Ing.  
Mecánica  
jsrivas@petecuy.univalle.edu.co

### JOHN JAIRO CORONADO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Grupo de Investigación en  
Mejoramiento Industrial  
Universidad del Valle. Escuela Ing.  
Mecánica  
johncoro@petecuy.univalle.edu.co  
johnjairocoronado@yahoo.com

fisura. La prueba para determinar CTOD<sub>c</sub> en deformación plana, para el modo I (tensión) de desplazamiento de abertura de grieta, ha sido normalizada con el fin de obtener resultados reproducibles. El procedimiento recomendado aparece en la norma americana ASTM E1290 y la prueba consiste en aplicar carga hasta la fractura a una probeta que contiene una grieta preexistente, usualmente desarrollada por fatiga a partir de una entalla maquinada. El CTOD es determinado a partir del registro de carga contra desplazamiento de abertura en la entalla.

Las grietas se pueden formar por fatiga en cualquier lugar de un componente, donde el esfuerzo y la deformación sean lo suficientemente altos como para causar deslizamiento alterno continuo, seguido también por un proceso de propagación. En la Figura 1 se muestra un eje de molino de caña de azúcar que ha desarrollado fisuras longitudinales. Es generalmente aceptado que la fractura dúctil inicia después de que se ha rebasado una deformación crítica de tensión en la punta de la grieta. El acero SAE 1045, es ampliamente utilizado en la fabricación de ejes y generalmente no se conocen las

propiedades fractomecánicas del material. La escasez de esta información ha llevado a los ingenieros a utilizar factores de seguridad elevados para diseños pensados en larga vida bajo cargas de fatiga, lo que hace necesario realizar ensayos que permitan determinar dichas propiedades fractomecánicas. Por lo expuesto anteriormente, se diseñó y construyó un dispositivo prefisurador, necesario para producir fatiga en la probeta y poder determinar las propiedades fractomecánicas de diferentes materiales.



Figura 1. Eje de molino con fisuras longitudinales.

## 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En la Figura 2 se muestra un esquema del montaje del dispositivo prefisurador con sus respectivas partes, las cuales fueron maquinadas, a las dimensiones obtenidas según el diseño mecánico de cada elemento mecánico, (ver Tabla 1). El sistema de doble excéntrica es ajustado por medio de un disco guía y cuatro tornillos, de los cuales tres sujetan el disco a la excéntrica interna y el otro restante sujeta la excéntrica externa. El ajuste de excentricidad se hace cada 10 grados de giro relativo de la excéntrica interna con respecto a la externa. El rodamiento usado como actuador de carga es un rodamiento rígido de bolas, fue seleccionado teniendo en cuenta las cargas radiales aplicadas y pequeñas deformaciones en el eje prefisurador.

El actuador de carga cuenta además con un disco en su parte externa que protege la pista del rodamiento, a su vez éste también permite fijar el aplicador de carga que hace contacto directo con la superficie de la probeta, el cual es de forma cilíndrica y tiene un radio que está relacionado en la norma ASTM E-399. Las instalaciones para el ensayo también están provistas de un soporte para garantizar que la probeta quede simplemente apoyada, sus dimensiones están dadas también bajo la norma ASTM E-399, éste soporte cuenta con el diseño de dos topes laterales para evitar su desplazamiento en las direcciones transversal y longitudinal. Para la probeta también se diseñaron dos topes, los cuales están puestos en sus extremos para que cumplieran la misma función que los diseñados para el soporte. La instalación además de esto incluye un brazo que bloquea el disco protector ante posibles oscilaciones en el momento de los ensayos.

La maquina se adaptó a una fresadora universal, la cual tiene un motor DC con una potencia de 4hp.

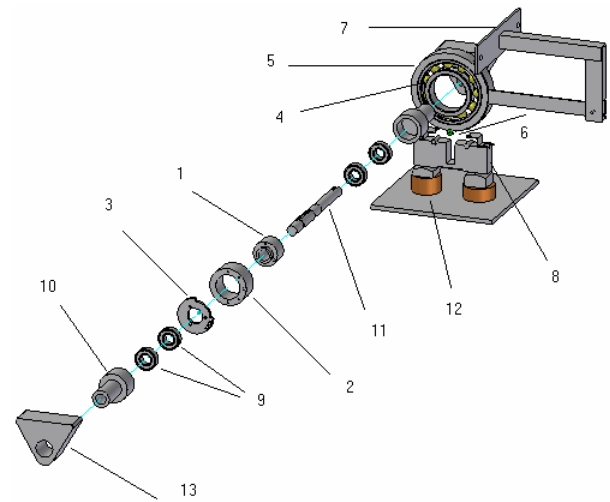


Figura 2. Partes del banco prefisurador

1	Excéntrica interna
2	Excéntrica externa
3	Disco guía
4	Rodamiento actuador
5	Disco protector
6	Aplicador de carga
7	Brazo fijador
8	Soporte de probeta
9	Pines cilíndricos
10	Alojamiento de rodamiento
11	Eje prefisurador
12	Topes para soporte
13	Topes para probeta

Tabla 2.1. Partes del banco prefisurador

## 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El paso más importante en la metodología experimental fue calcular la carga máxima y mínima con las cuales producir un estado de fatiga en la probeta, esto con el fin de obtener un valor del factor de intensidad de esfuerzos exigido por la norma ASTM E – 1290 – 89. Durante la prueba de prefisuración la carga se relaja a medida que la longitud de fisura aumenta, por esto fue necesario elaborar una hoja de cálculo que evalúa la disminución de la carga con el aumento de la longitud de la grieta. En la hoja de cálculo se relacionó la carga aplicada en la probeta para distintas deflexiones de la misma, se utilizó el modelo de una viga de doble inercia mostrada en la figura 3.

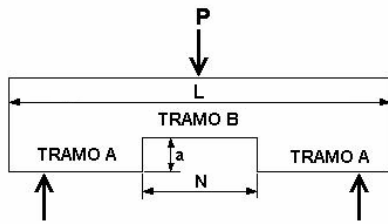


Figura 3. Modelo viga doble inercia.

En este modelo se supone que la abertura central tiende a cero hasta considerarse como una entalla, del modelo se obtuvo la deflexión  $\delta$  :

$$\delta = \frac{P}{48E} \left[ \left( \frac{L^3}{I_B} \right) + \left( \frac{(L-N)^3}{I_A} \right) - \left( \frac{(L-N)^3}{I_B} \right) \right] \quad (1)$$

Donde L es la longitud total, N es la longitud del tramo B, E es el modulo de elasticidad,  $I_A$  e  $I_B$  son los momentos de inercia de las secciones A y B respectivamente. En esta expresión se fijó la deflexión sufrida por la probeta, se hicieron incrementos de la longitud de fisura, la cual variaba a su vez el momento de inercia (sección B), obteniendo así la variación de la carga. Esta iteración se hizo para distintas deflexiones en la probeta, las cuales se mantenían constantes para cada iteración. De esta manera se estableció la carga mínima y máxima en función de la excentricidad, teniendo en cuenta que la carga máxima obtenida con la excentricidad constante no fuera mayor a la máxima permisible exigida por la norma. En la tabla 2 se muestran los datos de carga máxima y mínima en función de la longitud de fisura.

Long. Fisura (mm)	Pmax (N)	Pmin (N)
7.6905	3323.80	90.92
7.8810	3290.69	73.25
8.0715	3246.81	72.32
8.2620	3201.12	71.36
8.4525	3153.55	70.35
8.6430	3104.05	69.31
8.8335	3052.56	68.22
9.0240	2999.03	67.09
9.2145	294342	65.91
9.2145	2885.68	64.69

Tabla 2. Cargas máximas y mínimas relacionadas con la longitud de fisura.

Las cargas obtenidas en el ensayo se lograron prefisurando con una excentricidad constante, lo cual se determinó experimentalmente. Se estableció como valor de precarga para la probeta la carga máxima obtenida en la hoja de cálculo ( $P_{max} = 3323.8$  N). Los intervalos de crecimiento de la longitud de fisura se hicieron cada 1.905 mm llegando hasta una longitud final de 9.2145 mm. La variación de la excentricidad (deflexión en la

probeta) se hizo cada 0.00127mm hasta obtener una excentricidad de 0.037592 mm.

Para el cálculo del número de ciclos de aplicación de la carga para generar una grieta de fatiga de 1.3 mm en la probeta, se hizo uso de la ecuación de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2)$$

Donde C y n son variables empíricas que tienen los siguientes valores:  $C = 6.89 \cdot 10^{-12}$ ,  $n = 3$  (para aceros ferrítico-perlíticos), N es el número de ciclos de aplicación de la carga y  $\Delta K$  es el rango de la intensidad de esfuerzo. El valor de K se estimó con la hoja de cálculo por medio de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Y P}{B W^{1/2}} \quad (3)$$

Donde Y representa la rigidez de la probeta y está dada por la siguiente expresión:

$$Y = \frac{6(a/W)^{1/2}(1.99 - a/W[1 - a/W] \cdot [2.15 - 3.93a/W + 2.7(a/W)^2])}{(1 + 2a/W) \cdot (1 - a/W)^{3/2}} \quad (4)$$

Donde a es la longitud de la fisura y W es el ancho de la probeta. Resolviendo la ecuación de Paris para N se obtuvo:  $N = 43104$  ciclos

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(\Delta K)^n} = C \int N = C N \quad (5)$$

Donde  $a_f = 0.0092145$ m y  $a_0 = 0.0075$  m. Para hallar el valor  $\Delta K$  se usaron los datos de la Tabla 2, con cada uno de estos datos se halló un valor de K, de donde se obtiene:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (6)$$

$\Delta K$ (MPa*m <sup>0,5</sup> )	a (m)
17,03106071	0,432588942
17,25523773	0,438283038
17,47445553	0,44385117
17,68793909	0,449273653
17,89483704	0,454528861
18,0942196	0,459593178
18,28507692	0,464440954
18,46631787	0,469044474
18,63676923	0,473373939
18,79517587	0,477397467

Tabla 3. Datos  $\Delta K$  vs. a.

En la tabla 3 se observan los valores  $\Delta K$  suministrados por la hoja de cálculo La figura 4 muestra la grafica de tendencia que relaciona el comportamiento de  $\Delta K$  con respecto al aumento de la longitud de fisura  $a$ .

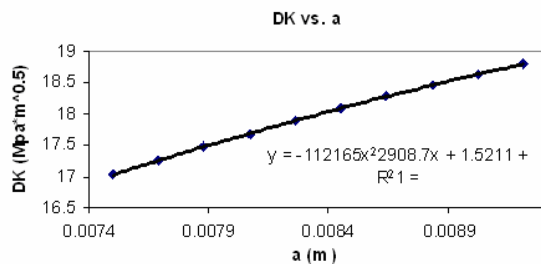


Figura 4. Relación entre  $\Delta K$  y  $a$

La ecuación resultante que representa la variación de  $\Delta K$  vs  $a$  donde ésta última es la variable independiente, se integró numéricamente y se obtuvo el siguiente valor:

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(\Delta K)^n} = 2.9 * 10^{-7} = (6.89 * 10^{-12}) N$$

La velocidad del eje se fijó en 576 rpm con lo que fue posible hallar el tiempo de duración del ensayo de prefisuración:  $t = 74.83 \text{ min} = 1 \text{ hr } 14.83 \text{ min}$ . El objetivo de la celda de carga es conocer la excentricidad que brindaría el rango de cargas ya establecido. Para establecer la precarga se equilibró el soporte de la probeta en uno de sus extremos sobre la celda de carga, en el otro extremo se apoyó sobre una pieza semejante a la celda, luego se ubicó el aplicador de carga en la parte media de la probeta de tal manera que la carga quedase aplicada en línea con la entalla maquinada. Se registró por medio de un contador de ciclos de sensor óptico el número de ciclos de aplicación de la carga en la probeta, para obtener una longitud de grieta deseada. En la figura 5 se observa el montaje realizado para darle la precarga a la probeta. En la figura 6 se muestra el montaje final para realizar los ensayos de prefisuración de probetas.

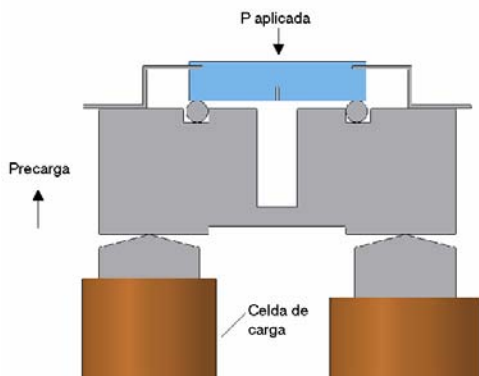


Figura 5. Montaje de precarga.

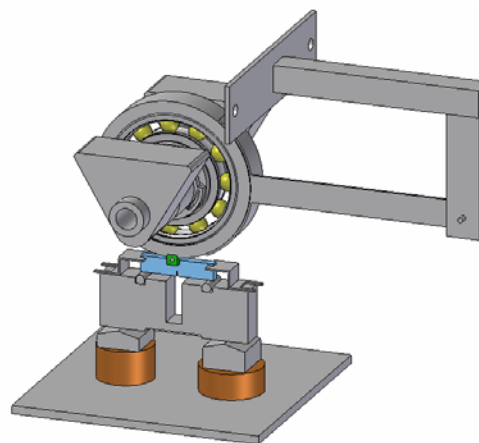


Figura 6. Montaje final

#### 4. RESULTADOS

El CTOD ha sido adoptado principalmente como parámetro de evaluación de la tenacidad a la fractura en soldaduras y experimentalmente es evaluado indirectamente a partir de la medición del desplazamiento en la dirección de la línea de carga ( $\delta_I$ ). En el procedimiento de ensayo CTOD se va aplicando una carga progresivamente creciente hasta que se produzca la fractura por crecimiento inestable de la grieta y se va midiendo el desplazamiento  $\Delta v$  entre dos puntos localizados simétricamente en lados opuestos del plano de grieta, dicho desplazamiento es medido con el “clip gage” y la carga es registrada por la maquina de tensión. En el desarrollo del ensayo se obtienen de manera simultánea datos de carga y apertura de la entalla, de tal manera que al final se obtiene una grafica de carga (P) vs. Desplazamiento ( $v$ ).

Para realizar el ensayo CTOD, inicialmente se llevaron a cabo los ensayos de prefisuración de las probetas, dichos ensayos se realizaron a una temperatura de 30° C, con una frecuencia de aplicación de la carga igual a 9.6 hz. Se ajustó el mecanismo doble excéntrica y se precargó la probeta, una vez se proporcionó la precarga se procedió a prefisurar y se registró el número de ciclos calculado para generar una grieta de fatiga. En la figura 7 se observa la propagación de la fisura, a partir de la entalla mecanizada.

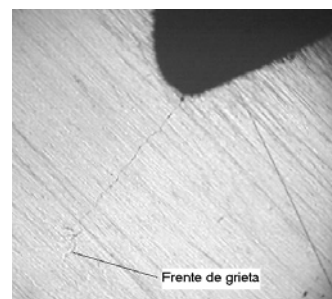


Figura 7. Propagación de la prefisura a 100X

Para hallar la carga máxima con la que se llevaría la probeta a la fractura final se usó la ecuación 3. Donde se supuso un valor de  $K = 90 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$  para el acero SAE 1045,  $Y$  fue calculado con la ecuación presentada anteriormente  $Y = 9.44$  y la carga máxima de ruptura en la probeta fue:  $P = 13.486 \text{ KN}$

El siguiente paso en el ensayo CTOD fue hacer el montaje de la probeta en la maquina de tensión cuya capacidad es de 20 KN, conectar el “clip gage” al dispositivo para registrar la apertura en la grieta y ubicarlo en la probeta y luego se procedió a fracturar las probetas. La máquina se programó para aplicar la carga con una velocidad de 2 mm/min, la temperatura de ensayo fue de 28° C. En la figura 8 se muestra el montaje en el momento del ensayo. En la probeta se puede observar la zona plástica sobre la entalla mecanizada.

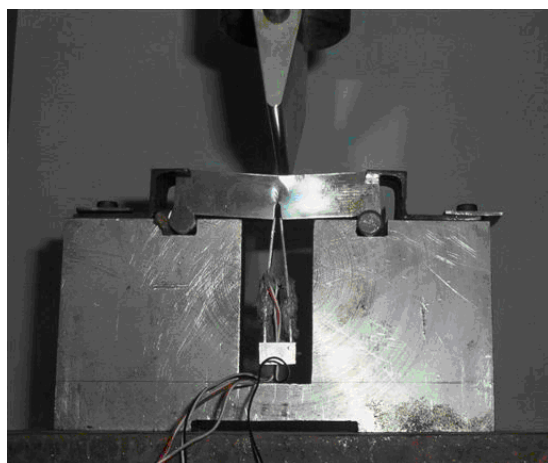


Figura 8. Montaje experimental CTOD.

La grafica 9 muestra el comportamiento que presentó cada probeta con las condiciones de ensayo ya mencionadas. Las curvas obtenidas en el ensayo representan uno de los eventos típicos de los ensayos CTOD, estos representan un crecimiento estable de grieta con una plataforma de carga máxima de comportamiento plástico generalizado.

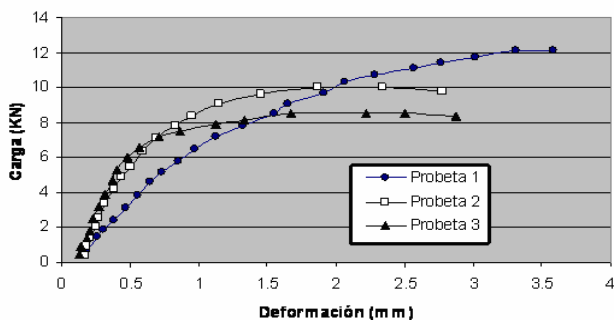


Figura 9. Comportamiento fracto-mecánico de las probetas.

El valor  $CTOD_C$  representa una deformación dúctil después de que se ha rebasado una deformación crítica de tensión en la punta de la grieta, para determinar dicho parámetro, es necesario determinar el componente plástico  $v_p$  del correspondiente desplazamiento. Para ello se traza una línea desde el punto correspondiente a la carga máxima, paralela a la línea de carga elástica inicial hasta encontrar el eje de las abscisas, quedando de esta manera definido el desplazamiento plástico  $v_p$ . El valor de  $CTOD_C$ , en función del desplazamiento plástico se calcula por la siguiente formula dada por la norma ASTM – 1290 -89:

$$\delta_I = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{2 S_y E} + \frac{0.4(W - a)v_p}{0.4W + 0.6a} \quad (7)$$

Donde  $\nu$  = relación de poisson,  $E$  = modulo de elasticidad para aceros,  $S_y$  = esfuerzo de fluencia,  $K_I$  = tenacidad a la fractura calculado con  $P_Q$ . De las graficas se obtienen los valores de carga  $P_Q$  para cada probeta,  $v_p$ , reemplazando estos en las formulas citadas se obtuvieron los siguientes resultados, ver Tabla 4.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$P_Q$ (KN)	9,2	8,7	7,7
$K_Q$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	70,78	67	59,24
$V_P$ (mm)	1,1389	0,7702	0,8135
$CTOD_C$ (mm)	0,38	0,26	0,27

Tabla 4. Resultados de la prueba.

El  $CTOD_C$  es una propiedad fractomecánica de cada material y entre mayor sea su valor mayor será su resistencia a la propagación inestable de grietas.

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó y construyó un banco de pruebas para generar fisuras por fatiga en probetas tipo flexión en tres puntos, el cual cumplió con los requerimientos necesarios para llevar a cabo éste propósito.

Los cálculos de los parámetros teóricos hechos bajo varias suposiciones para la realización de los ensayos de prefisuración y CTOD, sirvieron para obtener resultados experimentales. El valor de  $CTOD_C$  para el acero laminado en caliente se puede promediar usando las probetas 2 y 3, ya que la probeta 1 está alejada de estos valores.

La prueba CTOD demostró la hipótesis de que la carga se relaja a medida que se propaga la grieta, hasta alcanzar una plataforma máxima que representa un

comportamiento plástico del material, esto debido a la disminución de la rigidez de la probeta.

Los ejes de molino de caña de azúcar se fabrican usando el proceso de forjado y cuando se desgastan o tienen fisuras superficiales se recuperan usando soldadura por arco sumergido, por tal motivo se recomienda caracterizar el acero forjado y los materiales de aporte para compararlos y poder recomendar un procedimiento de soldadura para recargar los ejes, que soporten en mayor medida la propagación de fisuras.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Universidad del Valle), en el marco del “Proyecto Cooperativo Agroindustrial para Reducir el Desgaste en Equipos de Preparación y Molienda” que se lleva a cabo en el Ingenio Manuelita S.A., con la participación de CENICAÑA, agradece los aportes del personal de estas organizaciones y el apoyo financiero de COLCIENCIAS, que con dinero del BID, ha posibilitado este trabajo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARWOOD, S. J. The Welding Institute. A Crack TIP Opening Displacement (CTOD) method for The Analysis of Ductile Materials, ASTM STP 945, June 1985.
- [2] KANNINEM, M. F., POPELAR C. H. Advanced Fracture Mechanics, Oxford University Press, 1985.
- [3] KIM, K. S.” Fracture resistance of a steel weld joint under fatigue loading”. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 66, pp.403-419. 2000.
- [4] KROMPHOLZ, K. KALKHOF, D. Fracture Initiation of Geometrically Scaled, Notched Three-Point-Bend Bars of Low-Alloy Steel, Engineering Fracture Mechanics 70, 2459-2472, 2003.
- [5] PARKER A. P. The Mechanics of Fracture and Fatigue, F.N. Son Ltd, 1981.
- [6] STANDARD TEST METHOD FOR PLANE-STRAIN FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS, Annual book of ASTM standards, E 399, Vol. 03.01, ASTM, 1984.
- [7] STANDARD TEST METHOD FOR CRACK – TIP OPENING DISPLACEMENT (CTOD) FRACTURE TOUGHNESS MEASUREMENT, ASTM 1290, Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM, 1989.