

Cálculo de la Tenacidad a la Fractura del acero ASTM A36 soldado, evaluado mediante el parámetro CTOD

Calculation of the fracture toughnesses in ASTM A36 welded steel, evaluated for CTOD parameter

Segundo A. Távara Aponte¹; Gonzalo O. Peralta Silva²; Gastón Távara Aponte³

Resumen

En este trabajo se calculó la Tenacidad a la Fractura del acero ASTM A36 soldado, evaluado mediante el parámetro CTOD. Los ensayos de tracción mostraron una curva σ vs ϵ con una zona plástica que indica que el material tendrá un comportamiento elastoplástico. Se determinó previamente la curva de resistencia al crecimiento de la fisura (curva R) en la que el parámetro CTOD se incrementa al producirse el avance de la fisura, la cual representa el valor del CTOD en función del crecimiento estable de fisura. Se utilizó la norma ASTM E 1820-99, usando el método uniprobeta. Se realizaron ensayos de tracción para obtener los valores de tensión de fluencia y tensión de rotura, que se utilizan para calcular la carga de prefisuramiento, así mismo para calcular el CTOD. Las dimensiones de las probetas para la determinación del parámetro crítico de fractura $CTOD_{IC}$, fueron las adecuadas, ya que cumplieron con la restricción: $W-a_0 \leq 35 \cdot CTOD_{IC}$. Los resultados obtenidos para valores de $CTOD_{IC}$ presenta un valor de tenacidad a la fractura en 0.35 mm. La implementación de estos ensayos son de importancia para la industria debido a que el uso de la técnica de la complianza elástica según la norma ASTM 1820-99, permite determinar las curvas J-R y obtener una precisión suficiente de resultados, disminuyendo de esta manera la cantidad de ensayos necesarios; comparados con el método multiprobeta.

Palabras clave: Tenacidad a la fractura, aceros ASTM A36, mecánica de fractura elastoplástica, TOD (abertura en boca de fisura).

Abstract

The present research it the calculation of the fracture toughnesses in ASTM A36 welded steel, valuated for CTOD parameter. The tests of traction showed a curve σ vs ϵ , with a plastic zone that indicates that it(he,she) will have an elasto-plastic behavior diagram $CTOD-\Delta a$ was determinated previously, it shows CTOD value in fuction to stable crack growing. Standarf ASTM E 1820-99 was used, the single specimen method using indirect measurments to calculate crack size during the test. Tests of traction were realized for the preliminary calculations of prefisuramiento and for the calculation of the CTOD. The dimensions of the manometers for the determination of the critical parameter of fracture $CTOD_{IC}$, were the suitable ones, since they expired with the restriction: $W-a_0 \leq 35 \cdot CTOD_{IC}$. The results obtained for $CTOD_{IC}$ values it presents a value of tenacity to the fracture in 0.35 mm. This work is important because in the present research is being implemented this mechanical fracture test which is very important to ASTM 1820-99 Standard. It allows the determination of J-R diagrams and to obtain enough result precision reducig the number of test, in comparison with the multiple specimens' method.

Keywords: Fracture toughnesses, AISI A36 steel, Mechanics of elastoplastic fracture, CTOD (Crack-Tip-Opening-Displacement).

Introducción

Hace unas cuantas décadas en el diseño de una estructura o pieza mecánica, sólo se tomaba en cuenta la tensión de fluencia del material (σ_y), como la única propiedad del material, para el análisis de esfuerzos, debido a que se consideraba que los materiales eran totalmente homogéneos, sin embargo esta concepción ha cambiado, ya que en la actualidad se sabe que todos los materiales presentan defectos propios de su proceso de manufactura, como son: vacancias, dislocaciones, inclusiones no metálicas, poros y fisuras.

1 Universidad Nacional de Trujillo, aristidestavara@hotmail.com.

2 Universidad Tecnológica del Cono Sur

3 Universidad Privada Antenor Orrego.

Las fisuras son los defectos más críticos, ya que estos actúan como concentradores de tensión, los cuales pueden llegar a propagarse debido a fatiga, sobrecarga, o algún choque térmico. Por esta razón, la presencia de una fisura en una estructura es crítica, ya que esta puede ocasionar una fractura catastrófica inesperada bajo condiciones de carga tensil significativamente menores a aquella correspondiente a la resistencia a la tracción normal del material (Anderson, 1991). Con la introducción de las estructuras soldadas se puso de manifiesto lo inadecuado que resulta este diseño para estructuras que puedan contener fisuras (Herrera, 1986).

El diseño tradicional mostró su deficiencia cuando se presentaron condiciones en las que la fractura puede ocurrir a niveles de tensión por debajo del límite de diseño elástico. Surgiendo así el análisis estructural basado en conceptos de la Mecánica de Fractura, en donde se cuantifica la combinación crítica de las variables: carga, tamaño de fisura y tenacidad a la fractura. A pesar de los grandes avances realizados muchos aspectos todavía no son acabadamente entendidos, entre ellos las limitaciones geométricas de los criterios lineal elásticos y sus técnicas de determinación experimental (De Vedia, 1991).

Actualmente, la Mecánica de Fractura es una disciplina ingenieril que considera a estos defectos, semejantes a una fisura (tanto en micro, como en macro escala) sobre la integridad estructural, la cual se basa en la suposición de que fisuras, o defectos semejantes a fisuras, que están inicialmente presentes o podrían desarrollarse durante el servicio. La tenacidad a la Fractura en Deformación Plana (K_{IC}), se define como “La capacidad que tiene un material de soportar carga, aún en presencia de defectos, siendo el defecto más críticos una fisura”, el cual se mide experimentalmente mediante el Factor de Intensidades de Tensiones en Modo I (K_{IC}). Siendo esta una propiedad del material que depende de las variables siguientes: estado tensional, tamaño del defecto y geometría del defecto, condiciones del material, temperatura del medio, etc (De Vedia, 1991).

Para el ingeniero la fractura frágil es extremadamente importante por dos razones: primero, la mayor parte de los aceros estructurales soldados exhiben comportamiento frágil a bajas temperaturas (el comportamiento dúctil se presenta a más altas temperaturas); y segundo, la fractura catastrófica repentina asociada con la fractura frágil, puede ocurrir bajo condiciones de carga tensil significativamente menores que aquella correspondiente a la resistencia a la tracción normal del material. La aplicación de la Mecánica de Fractura a estructuras ingenieriles se justificó por la ocurrencia de fallas catastróficas de gran importancia económica y con pérdida de vidas en algunos casos, produciéndose estos desastres en diferentes campos tales como barcos, estructuras fuera de costa, tanques de almacenamiento de líquidos, recipientes de presión, cañerías, puentes, aviones, piezas de generación de energía, etc (Broek, 1994).

Si bien hoy en día el Acero ASTM A36 es usado en la fabricación de árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, pines de sujeción, pasadores, chavetas, etc., debe ajustarse tanto su resistencia a la Tracción como su Tenacidad a la Fractura, siendo esta última propiedad muchas veces solo evaluada por ensayos charpy, el cual solo nos sirve como un índice de comparación (Boehler, 1997; Las Heras 1990).

A pesar que a nivel mundial se han realizado trabajos en mecánica de fractura, en nuestro medio, las industrias metal – mecánica de la zona aun no han incorporado parámetros fractomecánicos como son: el factor de intensidad de tensiones K_{IC} , el CTOD

y la Integral J_C como parámetros de diseño. En nuestra Universidad se han hecho algunos trabajos en Mecánica de fractura para materiales en estado de suministro, así con tratamientos térmicos (Aranda, 2005; Rojas 2005). El objetivo del estudio fue calcular la Tenacidad a la Fractura de aceros estructurales soldados en régimen lineal elástico y en régimen elasto-plástico; resultados que servirán para la industria regional y nacional.

Material y método

El material estudiado en este trabajo ha sido un acero ASTM A 36 de acuerdo a las normas internacionales. Dicho material ha sido suministrado por ACEROS BOEHLER DEL PERÚ S.A., en forma de plancha de 1” de espesor y de una varilla de 5/8” de diámetro. La composición química del acero usado es C (0.28%), Si (0,3%) y Mn (0,7%).

Tabla1: Propiedades mecánicas del acero estudiado (de acuerdo al fabricante)

Estado	Límite de Fluencia min. Kg/mm ²	Resistencia a la Tracción Kg/mm ²	Alargamiento (L=5d) min. %	Contracción min. %	Dureza
Natural	37	65	15	35	193 HB

Materiales Consumibles

Fabricación de Probetas. Probetas para ensayos de Tracción (según norma ASTM E 8M). Probetas para ensayos de Fractura (según norma ASTM E 1820).

Tratamientos Térmicos. Carbón vegetal, arcilla refractaria.

Análisis Metalográficos. Para el encapsulado : Resina epóxica, peróxido y cobalto.

Ensayos de Tracción. Máquina Universal ALFRED J. AMSLER & Co. de 10 Tn de capacidad de carga.

Análisis Metalográfico. Microscopio Óptico: NEOPHOT 21.Desbastadoras : Metasinex Pulidora rotativa: DAP-V.

Tratamientos Térmicos. Horno eléctrico tipo mufla con control electrónico de temperatura, caja metálica, tenazas, guantes de cuero y traje térmico.

Prefisuramiento de probetas de fractura. Máquina de ensayos de Fatiga en Tracción y Flexión en tres puntos, con un sistema adquisidor de datos por computadora. Microscopio Stereo Carl Zeiss Jenna, microscopio manual de 50x .

Ensayos de Tenacidad a la Fractura. Máquina de Ensayos de Tracción AMSLER de 10Tn de capacidad de carga.ComputadoraTarjeta de interfase de 12 bits Celda de Compresión de 2 Tn de capacidad de carga, calibrada de 0 a 1500 Kg Clip Gage, longitud de medida máxima de 9 mm, calibrada de 3 a 7 mm. Soporte Mecánico.Amplificador de Instrumentación de 2 canales. Programa de Adquisición de Datos durante el ensayo, y un programa de postprocesamiento de la información.

Especificaciones de la elaboración de la junta soldada. La junta soldada fue realizada mediante el proceso SMAW (manual) en la posición de sobrecabeza con corriente continua al polo positivo, el procedimiento esta pensado para que el aporte térmico de la soldadura mantenga la temperatura entre pasada.

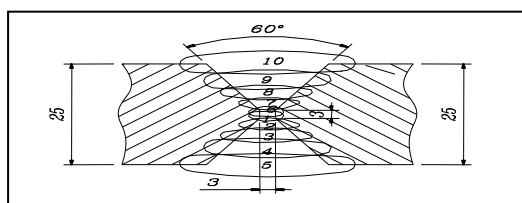


Tabla 4. Parámetros de soldadura usado en la elaboración de la junta soldada.

Tabla 3. Dimensiones de la plancha soldada.

Espesor (mm)	25
Ancho (mm)	250
Longitud (mm)	500

Electrodo	AWS E7018
Diámetro (mm)	3.2
Voltaje (V)	25
Corriente (A)	100
Velocidad Avance (mm/min)	101.6
Calor Aportado (J/mm)	1107.28

Métodos usados para el ensayo de las probetas.

a) **Análisis Metalográfico.** Luego de la obtención de las muestras se procedió al desbaste inicial, de la superficie a observación, con papel abrasivo N° 80 posteriormente el desbaste intermedio con 240, 400 y 600 y el desbaste final con papel abrasivo 1000, 1500, 2000 y el pulido de acabado se realizó en paño con alúmina $3 \mu\text{m}$. Con el objetivo de revelar la microestructura de la junta soldada, la superficie pulida fue atacada con una solución al 2% de ácido nítrico en alcohol etílico. La observación fue a 100X y 200X.

b) **Ensayo de tracción.** De las juntas soldadas se extrajeron y ensayaron 6 probetas según la norma E8M. Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura siguiente:

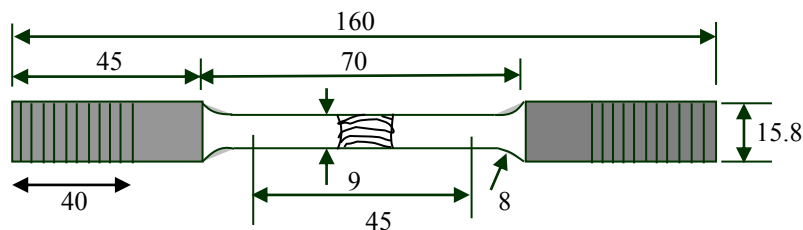


Figura 1. Dimensiones de la probeta de tracción (junta)

El propósito de este ensayo es investigar las curvas del proceso de tracción de las probetas y a la vez determinar las características mecánicas: límite de fluencia, límite de resistencia última a la tracción, tensión de rotura, alargamiento durante la rotura, reducción de área en el cuello y trabajo específico gastado hasta la rotura (índice orientativo de tenacidad). Utilizando una máquina de tracción AMSLER de 10 Tn.

c) **Ensayos de Tenacidad a la Fractura.** Se elaboraron y ensayaron 3 probetas de tenacidad a la fractura para cada zona de la junta soldada. Las probetas ensayadas tenían una geometría general del tipo SENB (flexión en tres puntos: Single Edge Notched Bend) de acuerdo a la norma ASTM E1820. Las probetas fueron extraídas de una plancha soldada de 1" de espesor en la orientación LS, tal como se muestra en la figura 2.

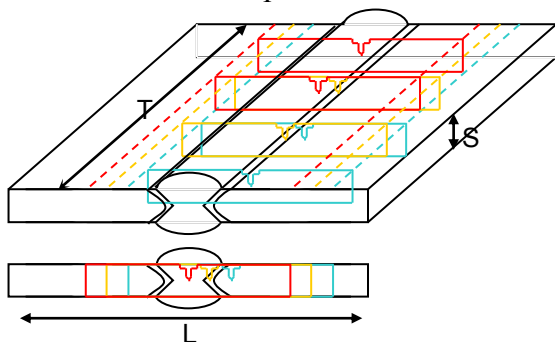


Figura 2: Esquema de extracción de las probetas Fractura

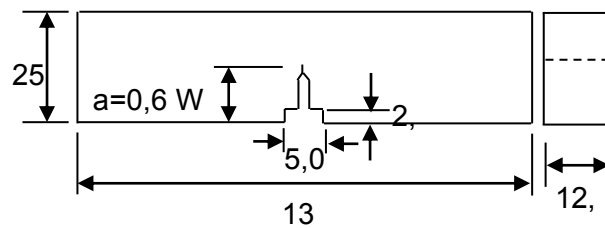


Figura 8: Geometría de las probetas de de fractura (LS)

Todas las probetas fueron fisuradas por fatiga en una máquina de fatiga de flexión en tres puntos de 2 Tn de carga máxima hasta alcanzar la relación de a/W próxima a 0,6. La prefisuración se llevó a cabo con una relación de carga de fatiga de $R = P_{\min}/P_{\max} = 0,1$. Una vez fisuradas por fatiga y entalladas lateralmente se procede a realizar el ensayo de fractura empleando la técnica de la compliancia elástica que consiste en realizar sucesivas descargas parciales de la probeta durante el ciclo de carga de la misma, con el fin de posibilitar la evaluación de la compliancia en distintos puntos del ensayo a partir de las pendientes de descarga. Así poder determinar las longitudes de fisuras alcanzadas.

Una vez completado el ciclo de descarga final, reducir la fuerza a cero, teniendo en cuenta de que no se produzca algún incremento en el desplazamiento, posteriormente marcar la extensión del crecimiento de fisura dúctil por medio de un teñido térmico realizado a 300°C por 30 minutos. Finalmente las probetas fueron rotas por fatiga utilizando como valor máximo de la carga de fatiga el 70% de la carga máxima alcanzada en la última descarga del ensayo y empleando una relación de carga de fatiga $R = P_{\min}/P_{\max} = 0,5$.

El valor del tamaño de la fisura se ha calculado como una media ponderada de 9 valores medidos a lo largo del espesor de la probeta, tal como se muestra en la figura 9, según recomienda la norma utilizada.

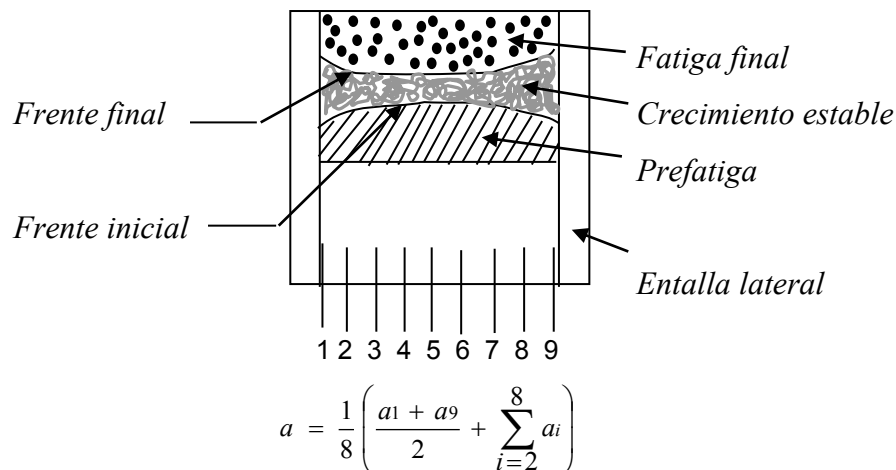


Figura 9: Medida del tamaño de la fisura

Resultados

Ensayos Metalográficos. La microestructura del acero ASTM A36 en estado de suministro presenta las fases ferrita y perlita, formando granos alargados, característica del proceso de laminado en caliente realizado en su conformado.



Figura 10: Microestructura del Acero ASTM A36 en estado de suministro; ferrita y perlita fina forma del grano alargada en el sentido de la laminación. 100X. Ataque químico con nital al 2%.

En la interfase del material base con la zona afectada por el calor la ferrita se afina y la perlita se engruesa encontrándose así partes de ferrita y perlita (MB) y ferrita fina y perlita basta (ZAC).

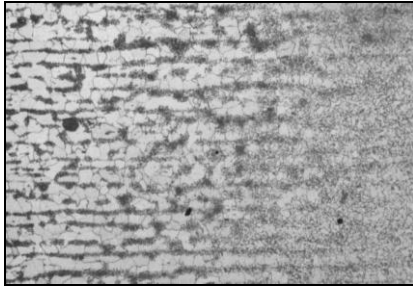


Figura 11: Microestructura de la interfase metal base (ferrita y perlita) + ZAC (ferrita fina y perlita basta). 100X. Ataque químico con nital al 2%.

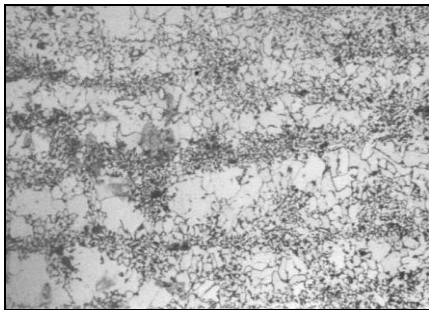


Figura 12: Microestructura de la zona afectada por el calor, ferrita fina y perlita basta. 200X. Ataque químico con nital al 2%. En la zona afectada por el calor cerca a la zona de fusión se presenta microestructura de ferrita muy fina con perlita fina y pequeñas islas de bainita inferior

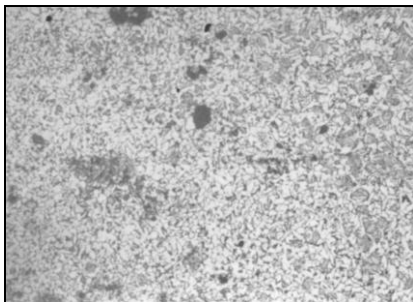


Figura 13: Microestructura de la Zona afectada por el calor, ferrita muy fina con perlita fina con pequeñas islas de bainita inferior. 200X. Ataque químico con nital al 2%. En la zona de fusión la microestructura es principalmente ferrita equiaxiada con perlita fina (figura 12) y en las cercanías a la zona afectada por el calor se presentan partes de ferrita poligonal con perlita fina

Ensayos de tenacidad a la fractura

Tabla 5. Valores del CTOD al inicio del crecimiento estable de la fisura ($CTOD_{IC}$)

Parámetro $CTOD_{IC}$ (mm)			Promedio de $CTOD_{IC}$ (mm)
$CTOD_{IC}$ 1	$CTOD_{IC}$ 2	$CTOD_{IC}$ 3	
0,36	0,31	0,38	0,35

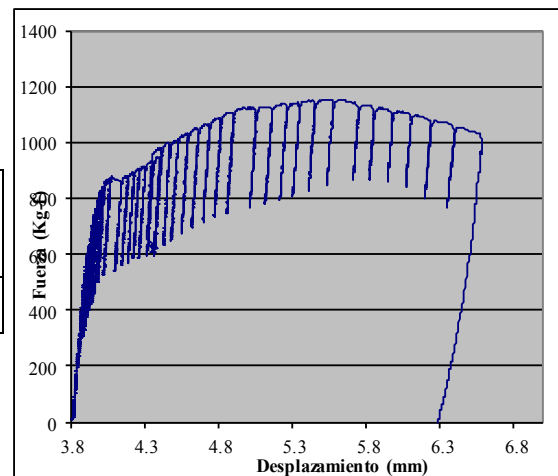


Figura 14 : Curva J-R

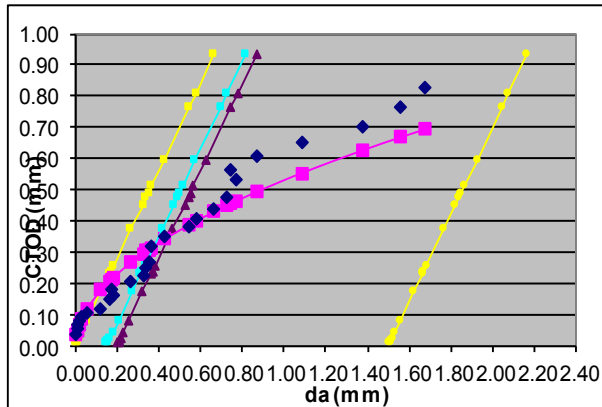


Figura 15 : Curva CTOD - R

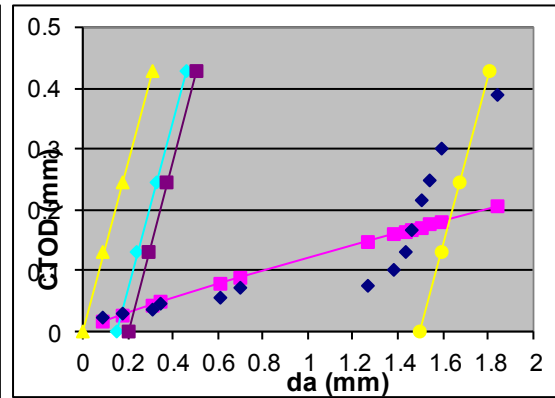


Figura 16.- Curva CTOD vs da

Fractografía

Probetas de Tenacidad a la Fractura

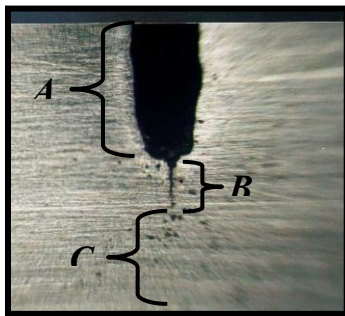


Figura 17 : Vista lateral de una probeta de Tenacidad a la Fractura prefigurada.
Zona A : Ranura realizada por el mecanizado. **Zona B** : Fisura por Fatiga.
Zona C : Ligamento resistente

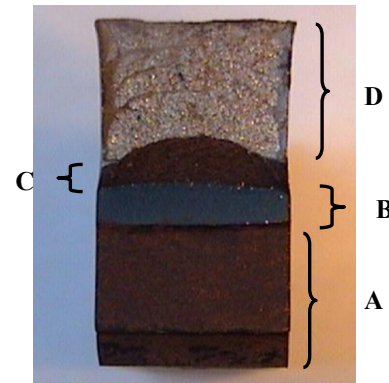


Figura 18 : Vista Transversal de una probeta fracturada de Tenacidad a la Fractura **Zona A** : Zona mecanizada. **Zona B** : Fisura por Fatiga **Zona C** : Crecimiento de fisura. **Zona D** : Zona fracturada

Discusión

Sobre el Diagrama Tensión-Deformación. Del material tratado térmicamente, se observa que conforme se aumenta el tiempo de Revenido, se disminuye la Resistencia a la Tracción y la Resistencia a la Fluencia, así también se aprecia que hay un aumento en su zona plástica, esto debido a la disminución de la martensita, y al crecimiento de la cementita, dando lugar a la globulización de este constituyente dentro de una matriz totalmente ferrítica, siendo la ferrita la que confiere la propiedad de plasticidad.

Sobre la Tenacidad a la Fractura. Observamos que conforme se aumenta el tiempo de revenido, también se aumenta la Tenacidad a la Fractura en el Régimen Elastoplástico $CTOD_{IC}$, debido a la disminución de martensita (microestructura mas dura y fragil), y la formación de cementita y ferrita (microestructura menos dura, pero mas tenaz).

Las dimensiones de las probetas para la determinación del parámetro crítico de fractura $CTOD_{IC}$, fueron las adecuadas, ya que cumplieron con la siguiente restricción:

$$W - a_0 \geq 35.CTOD_{Ic}$$

W = ancho de la probeta; a_0 = longitud de fisura inicial.

Conclusiones

Se logró evaluar la tenacidad a la fractura de las juntas soldadas del acero ASTM A 36, en régimen elastoplástico usando como parámetro fractomecánico el CTOD, basados en la norma ASTM E-1820; usando el método de uniprobeta mediante la técnica de la complianza elástica según la norma ASTM E-1820 se determinó las curvas J-R, disminuyendo de esta manera la cantidad de ensayos necesarios comparados con el método multiprobeta, esto es de mucha importancia para la industria.

Las dimensiones de las probetas para la determinación del parámetro crítico de fractura $CTOD_{Ic}$, fueron las adecuadas, ya que cumplieron con la restricción: $W - a_0 \geq 35.CTOD_{Ic}$ El software elaborado para la adquisición y postprocesamiento de datos por computadora, permitió la determinación de la curva CTOD-R mediante el empleo de la técnica de la complianza elástica, así también la obtención del parámetro fractomecánico $CTOD_{Ic}$ correspondientes al inicio del crecimiento estable de la fisura. Los resultados obtenidos para valores de $CTOD_{Ic}$ presenta un valor de tenacidad a la fractura en 0.35 mm.

Referencias bibliográficas

- Anderson T.L, 1991, “fracture mechanics fundamentals and applications”, crc. press. inc. (florida).
- Astm E 1820-99, 1999, “standard test method for measurement of fracture toughness”, annual book of astm. vol 03.01.
- Astm E 1152-87, 1995, “standard test method for determining j-r curves”, annual book of astm. vol 03.01.1995.]
- Esis p2-92, 1992, “esis procedure for determining the fracture behaviour of materials”, european structural integrity society, 1992
- Astm E 1290-87,1995, “standard test method for crack-tip opening displacement (ctod). fracture toughness measurement”, annual book of astm. vol 03.01. 1995.
- Astm e 813-87, 1995, “standard test method for j_{Ic} measure of fracture toughness”, annual book of astm. vol 03.01.1995.
- Astm E 8m-97, 1997, “standard test method for tension testing of metallic materials”, annual book of astm. vol 03.01.
- Belzunce, J; a. Viña, 2005, “fundamento de ciencia de los materiales”, universidad de oviedo.
- Boehler, 1997, “manual de aceros especiales”, lima – Perú..
- Broek, D. 1994, “the practical use of fracture mechanics”, fracture research inc, galena, oh, usa, 1994.
- De Vedia, 1991, “mecánica de fractura”, argentina 1991.
- Epri, 1992, “fundamentos de mecánica a la fractura. su aplicación a la industria nuclear”.
- Herrera R., 1986, “mecánica de fractura elasto-plástico aplicaciones a uniones soldadas”, tesis doctoral en ciencias de materiales, universidad nacional de mar de plata.
- Lasheras J.M., Sánchez M, 1990, “tecnología de los materiales industriales” 5^{ta} edición, editorial cedel, barcelona.
- Lázaro, A. 1997, “labview”, editorial paraninfo.
- Pérez Ipiña. J, 1995, “curso especializado tópicos de mecánica de fractura”, universidad del comahue, argentina ..