

Efecto del tamaño de probeta y orientación en la resistencia a la tracción y a la tenacidad a la fractura^(·)

J. Terán*, J.L. González**, J.M. Hallen** y M. Martínez*

Resumen

Este trabajo se dirigió a determinar el efecto de tamaño y orientación en las propiedades de tracción y tenacidad a la fractura mediante las curvas CTOD-R, utilizando probetas estándar y miniatura de una placa de acero estructural. El estudio requirió la estimación de la función flexibilidad de las probetas miniatura a partir de la curva carga *versus* desplazamiento. Los resultados experimentales y estadísticos muestran que tanto el tamaño como la orientación afectan las propiedades mecánicas y la tenacidad a la fractura. Las probetas miniatura de tracción mostraron valores de resistencia ligeramente mayores que las estándar pero una menor ductilidad. Las curvas CTOD-R de las probetas miniatura mostraron ser sensibles a las variaciones de carga y al método de medición de la abertura y longitud de la grieta. Asimismo, se observó inconsistencia del efecto de tamaño en la tenacidad a la fractura en la orientación longitudinal circunferencial (LC), siendo las orientaciones cortas menos resistentes y tenaces que las otras direcciones.

Palabras clave

Propiedades de tracción. Tenacidad a la fractura. Curvas CTOD-R. Función flexibilidad. Probetas compactas de tenacidad miniatura.

Specimen size effects on the tensile strength and fracture toughness

Abstract

In this work, an experimental research was conducted to determine size and orientation effects on tension and toughness properties through CTOD-R curves, using standard and miniature specimens taken from a structural steel plate. Compliance function estimation for the miniature size samples through load-displacement curves was considered. Experimental and statistical results showed that size and orientation affect tension and toughness properties. The miniature tension test specimens showed strength values slightly greater than the standard ones but with less ductility. Miniature specimen CTOD-R curves showed sensibility to load changes and measurement method of crack aperture and crack length. Inconsistency in fracture toughness for specimen orientation longitudinal circumferential (LC) regarding size effect was also observed. Short orientations showed less strength and toughness than the other directions.

Keywords

Tensile properties. Fracture toughness. Compliance function. CTOD-R curves. Miniature compact tension specimen.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas típicos en tuberías y recipientes a sujetos a presión es la presencia de grietas en la orientación radial. Para evaluar la severidad de este tipo de daños, es necesario conocer la resistencia a la fractura del material en esas direcciones; esto, sin embargo, resulta especialmente complejo por la limitación de la dimensión en la orientación corta, que impide la obtención de una probeta de dimensiones estándar. En los aceros de uso estructural, el problema se agrava pues, por lo general, estos materiales tienen

alta tenacidad a la fractura y, por consiguiente, el tamaño mínimo de probeta requerido puede ser demasiado grande. Así, por ejemplo, en los tubos y recipientes a presión, para obtener la tenacidad a la fractura en la orientación corta transversal (R-C) y la orientación corta longitudinal (R-L) (donde la dirección corta es el espesor), es imposible obtener un espécimen que cumpla con los requerimientos de la prueba estándar de tenacidad a la fractura. Debido a lo anterior, se ha propuesto realizar tales pruebas utilizando especímenes de tamaño reducido, referidos en este trabajo como miniatura. Sin embargo, es

(·) Trabajo recibido el día 13 de junio de 2006 y aceptado en su forma final el día 7 de febrero de 2007.

* CIVIE-Instituto Mexicano del Transporte, Apartado Postal 1098, 76000 Querétaro, Qro. Teléfono: (442) 2-16-97-77. Fax: (442) 2-16-96-71. e-mail: jteran@imt.mx

** ESQIE-Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Apartado Postal 75-872, 07300 México, D.F. Teléfono: (55) 57-29-60-00. Ext: 55281.

necesario determinar si sus resultados son válidos desde el punto de vista de la metodología de la prueba y, luego, relacionar el efecto del tamaño. Una vez resueltos estos dos problemas, se tiene la oportunidad de investigar el efecto de la orientación en las direcciones cortas, utilizando las probetas miniatura.

Los parámetros que se utilizan comúnmente para caracterizar el comportamiento de la fractura dúctil son la integral J y el CTOD^[1 y 2]. Estos parámetros determinan la tenacidad a la fractura como el punto de inicio del crecimiento estable de grieta, mediante la utilización de la curva R , que es una gráfica de J o CTOD, versus Δa . En ambos casos, es necesario conocer la función flexibilidad de la probeta, la cual, en el caso de las probetas miniatura, debe ser determinada ya que no existen funciones ya publicadas.

Las investigaciones para evaluar la tenacidad a la fractura con probetas miniatura consisten, básicamente, en modificar la geometría para obtener una curva R válida^[3 y 4]. Otros métodos se basan en la obtención indirecta de curvas R mediante la adaptación de resultados de pruebas tipo Charpy^[5] y, una tercera estrategia, consiste en utilizar modelos de micromecánica como los propuestos por Gurson^[6 y 7], en los que determina la tenacidad a la fractura a partir de parámetros característicos del material, obtenidos de probetas de tracción miniatura.

El análisis crítico de los métodos y resultados de la evaluación de propiedades de fractura en materiales elásticos plásticos ha demostrado que el comportamiento depende del método de prueba seleccionado (curva J-R o curva CTOD-R), de la geometría^[8] y del tamaño de probeta^[9 y 10]. Esta influencia se manifiesta no solo en los valores de tenacidad a la fractura, sino que también afecta la pendiente de las curvas R , que representa la resistencia al crecimiento de la grieta. Algunos investigadores han publicado que el valor de J_{IC} y la pendiente de la curva J-R se incrementan cuando el espesor disminuye^[11] y, otra investigación informa que el espesor no tiene una influencia significativa en la tenacidad a la fractura evaluada como δ_{IC} , pero si incrementa la pendiente de la curva CTOD-R^[12]. Sin embargo, poco se ha encontrado en cuanto al efecto del tamaño de probeta.

Existen informes de intentos exitosos de evaluación de propiedades mecánicas y tenacidad a la fractura con especímenes de tamaño reducido. Un estudio^[13] informa que las propiedades mecánicas obtenidas en probetas miniatura concuerdan con los obtenidos con las probetas estándar. En relación a la tenacidad a la fractura, otros autores^[14-16] informan de que no hay efecto del tamaño, siempre y cuando el resultado de la prueba de tenacidad cumpla con el criterio del espesor. Cabe aclarar que, en los trabajos anteriores, se utilizaron materiales fragilizados, por lo

que el resultado podría ser diferente en materiales dúctiles.

El efecto de la orientación en la tenacidad a la fractura, con base en las inclusiones y distribución de precipitados, ha sido ampliamente estudiado y documentado^[17 y 18] pero solo en aquellas orientaciones en las que es posible obtener probetas de tamaño estándar; sin embargo, hasta la fecha, no se ha publicado ningún estudio implicando probetas miniatura.

Es bien conocido que la pérdida de constricción plástica en la punta de la grieta tiende a incrementar la tenacidad, tal como sucede en la fractura dúctil donde, además aumentar la tenacidad a la fractura, también se incrementa^[19] la pendiente de la curva J-R. Es razonable esperar que en los especímenes de tamaño reducido la mayor relación de curvatura de la punta de grieta con respecto al ancho de la probeta induce una menor triaxialidad que en los especímenes más grandes hechos del mismo material. Por lo tanto, los especímenes de tamaño reducido deberían dar mayores tenacidades a la fractura y tener mayor resistencia a la propagación de la grieta, es decir, una pendiente de la curva J-R mayor. Sin embargo, este efecto parece ser contradictorio, pues otras investigaciones han encontrado un efecto contrario^[20]. Lo que es claro, es que hay un efecto del tamaño del espécimen en la tenacidad a la fractura, pero sus valores cuantitativos han sido poco documentados.

Para conocer el efecto del tamaño y, más importante, conocer la tenacidad a la fractura en la dirección corta de placa de acero estructural, se empleó, en este trabajo, la siguiente metodología:

- Diseño y calibración de la función flexibilidad de una probeta de tenacidad compacta miniatura,
- Evaluación de la tenacidad a la fractura con probetas de tamaño estándar y miniatura, con la misma orientación, para evaluar el efecto del tamaño y
- Evaluación de la tenacidad a la fractura en direcciones cortas.

El estudio se complementó con la evaluación de las propiedades de tracción en probetas de tamaño estándar y miniatura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado en esta investigación fue un acero tipo API-5L en forma de placa curva ya que proviene de una sección de tubo de 609,6 mm de diámetro y 25,4 mm de espesor, cuya composición química obtenida por absorción atómica se muestra en la tabla I.

Tabla I. Composición química del acero empleado en la experimentación

Table I. Chemical composition of the steel used in the experimentation

% C	% P	% S	% Mn	% Si	% Cu	% Ca
0,080	0,029	0,010	1,48	0,25	0,009	0,0018

Las propiedades mecánicas en tracción se contienen en la tabla II; éstas, se obtuvieron de pruebas de tracción uniaxial, tanto en probetas estándar como miniatura, en una máquina Instron 8503 de 500 kN de capacidad y con células de carga intercambiables de 100 kN y 10 kN. Las pruebas en tracción uniaxial se realizaron en control de carga a una velocidad de 0,049 kN/s y la longitud inicial para medir la elongación fue de 5 veces el diámetro de la probeta. Las figuras 1, 2 y 3 muestran la orientación y geometría de las probetas normalizadas y miniatura para los ensayos de tracción y de mecánica de fractura. Se obtuvieron 10 probetas estándar de tracción, 5 por cada orientación; 20 probetas miniatura para tracción; 5 por cada orientación. De la misma forma, se obtuvieron las cantidades de probetas para las pruebas de tenacidad a la fractura.

2.1. Metalografía

La figura 4 muestra la microestructura del acero API-5L utilizado para el estudio. En las direcciones longitudinal y circunferencial, se observa una microestructura bandeada de perlita fina en una matriz ferrítica, mientras que en la dirección del plano de laminación, la microestructura muestra una

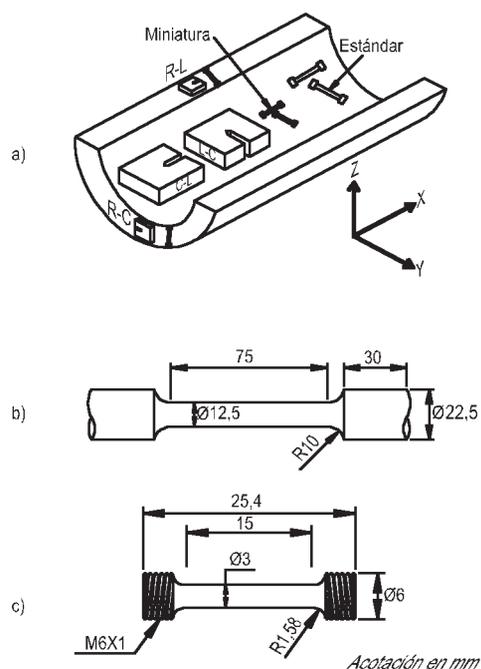


Figura 1. a) Orientación de las probetas de mecánica de fractura (CT) y de tensión; b) Geometrías y dimensiones de la probeta de tensión estándar; c) Geometría y dimensiones de la probeta de tensión miniatura.

Figure 1. a) Orientation of compact tension specimen (CT) for test of mechanics of fracture and tension test; b) Geometries and dimensions of standard specimens for tension test; c) Geometry and dimensions of the miniature specimens for tension test.

distribución poco uniforme de la perlita. El grano es equiaxial y su tamaño varía de 7 a 8 ASTM. En la

Tabla II. Propiedades mecánicas en tracción uniaxial del acero empleado en la experimentación API-5L

Table II. Mechanical properties of the tension of the API-5L steel used in the experimentation

Orientación de las Probetas	N	E (MPa)			σ_{ys} (MPa)			σ_{UTS} (MPa)			% Elongación		
		\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.
Lstd	5	202031	1117	0,55	394	3,41	0,87	521	3,65	0,70	28	0,91	3,25
Cstd	5	214731	3234	1,51	427	3,87	0,91	538	1,81	0,34	27	1,81	6,70
Lmini	5	185756	5003	2,69	442	28,12	6,36	533	5,87	1,10	21	3,89	18,52
Cmini	5	206767	9644	4,66	443	41,98	9,48	542	15,99	2,95	20	4,42	22,10
Rmini	9	198721	6279	1,72	355	26,45	4,40	491	15,77	1,92	25	4,96	19,16

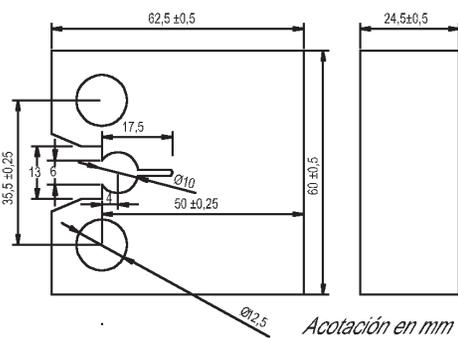


Figura 2. Dimensiones de la probeta tenacidad estándar.

Figure 2. Dimensions of the standard tensile compact sample.

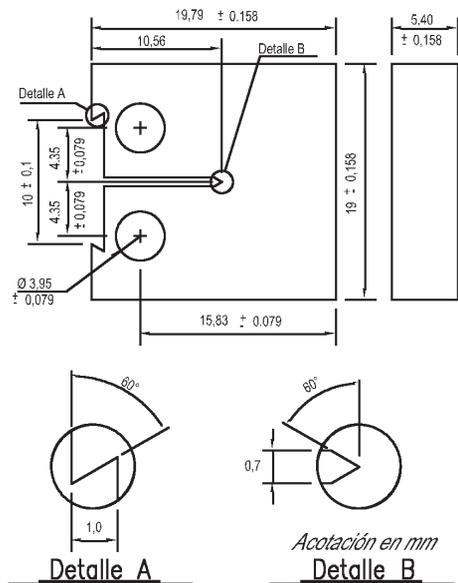


Figura 3. Dimensiones de la probeta de tenacidad miniatura.

Figure 3. Dimensions of the tension compact miniature sample.

figura 5 se muestra la apariencia de las inclusiones en los distintos planos de la placa, siendo la longitud promedio de 4 μm . Esta microestructura se considera típica para el tipo de acero utilizado aquí.

2.2. Simulación numérica

En el preagrietamiento por fatiga de los especímenes miniatura se encontró una incompatibilidad de la respuesta de la máquina servohidráulica, que provocó la

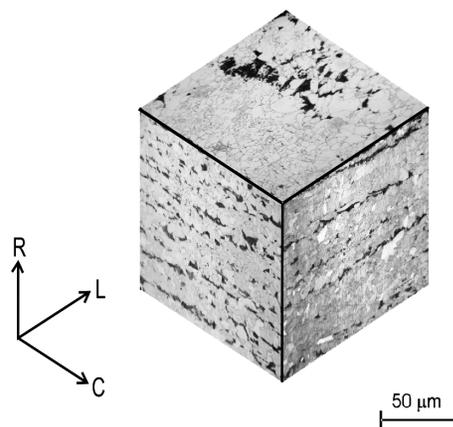


Figura 4. Microestructura del Acero API-5L tomada en las diferentes orientaciones de la placa. En la orientación corta muestra una estructura bandeada de perlita fina y ferrita.

Figure 4. Microstructure of the API-5L steel taken in different orientations of the plate. In the short orientation there is a banding structure of fine pearlite and ferrite.

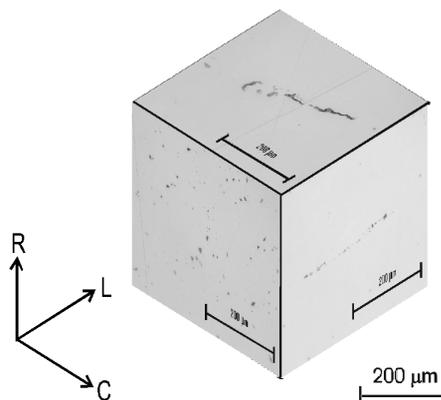


Figura 5. Microestructura de las inclusiones del Acero API-5L tomada en las diferentes orientaciones de la placa.

Figure 5. Microstructure of the inclusions of the API-5L steel taken in different orientations for the plates.

ruptura anticipada y/o deformaciones muy altas de la probeta, lo que invalidaba el método de prueba. Se determinó que era necesario obtener una función flexibilidad que permitiera ajustar la respuesta de la máquina; para esto, se realizó el análisis por elementos finitos del comportamiento de flexibilidad de la probeta miniatura evitando con ello el alto costo de una calibración experimental.

Se modeló la probeta miniatura de 5,34 mm de espesor y una relación W/B igual o mayor a 3, que son las dimensiones de las probetas reales. Se siguió la metodología propuesta por Solecki^[21]. Se utilizan elementos triangulares tipo sólido estructural bidimensional, de 8 nodos, con dos grados de libertad por nodo; debido a la simetría se modeló la mitad de la geometría, como muestra la figura 6. En la punta de la grieta se utilizó un mallado más fino con elementos modificados en los nodos intermedios para contrarrestar la singularidad numérica, colocándolos a un cuarto de la longitud del elemento. Las condiciones de frontera fueron: simetría en el plano de fractura, desplazamiento vertical limitado, aplicación de la carga en el orificio del perno, en dirección perpendicular al plano de la grieta. La carga fue 800 N constante, tal que se obtuviera un factor de intensidad de esfuerzos de $15 \text{ MPa m}^{1/2}$, para longitudes de grieta de $0,3 < a/W < 0,70$. Se obtuvieron los desplazamientos de abertura de la grieta en la cara frontal de la probeta (Fig. 6), cuyos valores fueron de 0,02 a 0,1 mm y, con estos resultados, se obtuvo un polinomio de quinto orden que relaciona el tamaño de grieta con el desplazamiento de abertura en la cara frontal de la probeta. Este polinomio se cargó al software de prueba de la máquina servohidráulica, a través del cual se estimaron los coeficientes de la función flexibilidad. Para aumentar la precisión de la función de tamaño de grieta, *vs.* desplazamiento de abertura en la cara frontal, se realizaron pruebas de propagación de grieta por fatiga en probetas miniatura, midiendo la longitud de la grieta y el desplazamiento; con estos resultados, se ajustó la función para la medición de la grieta en las pruebas definitivas del CTOD, resultando un polinomio de segundo orden,

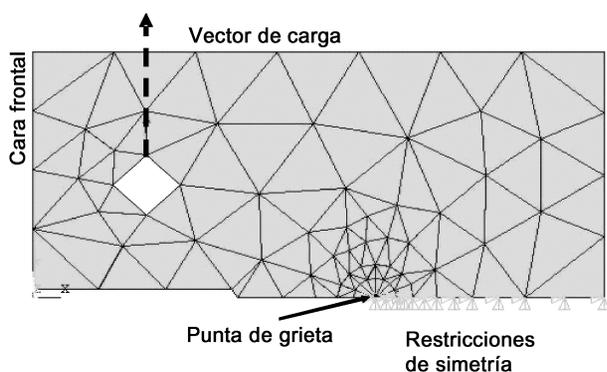


Figura 6. Modelo de Elementos Finitos y condiciones de frontera para la probeta de tenacidad miniatura.

Figure 6. Model of Finite Elements and border conditions for the tension compact miniature sample.

que se presenta en la sección de resultados, junto con su límite de validez.

2.3. Calibración de la flexibilidad en probetas de tenacidad estándar y miniatura

Una vez obtenida la función de tamaño de grieta en función del desplazamiento de abertura de la probeta miniatura, se procedió a la calibración de la función flexibilidad de esta, para lo cual, las caras laterales de las probetas miniatura fueron pulidas a espejo y con un vernier de altura, se marcaron líneas perpendiculares al plano de avance de la grieta, cada 0,25 mm. Se colocó la probeta en la máquina servohidráulica para lo que se fabricaron mordazas especiales, realizándose el agrietamiento por fatiga de acuerdo al estándar ASTM E 677-00^[22], con amplitud de carga constante y un ΔK inicial de $15 \text{ MPa m}^{1/2}$ hasta un tamaño de grieta en el intervalo de $0,35 < a/W < 0,6$. El crecimiento de la grieta se monitoreó con un estereomicroscopio y cada vez que la grieta alcanzaba una de las marcas laterales, se registró el desplazamiento de la abertura de grieta en la cara frontal de la probeta con un extensómetro tipo *clip*, en ciclos carga-descarga, de los cuales se determinó la pendiente que representa el inverso de la función flexibilidad. Después de los ensayos carga-descarga, se aplicó carga hasta la fractura y se midió la longitud inicial y final de grieta por fatiga en la superficie de fractura. Esta medición se realizó con un analizador de imágenes, para lo cual se realizó un tinte térmico, mojando la probeta en aceite soluble en agua e introduciéndola en una mufla a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 20 min y enfriando al aire.

La longitud de grieta en las probetas estándar se midió por la función flexibilidad dada en la norma ASTM E647^[22 y 23]; el desplazamiento de abertura se midió con un extensómetro colocado sobre la línea de carga de la probeta.

2.4. Obtención de las curvas CTOD-R

Conocidos los valores de la flexibilidad, se realizaron las pruebas para la obtención de las curvas CTOD-R en la máquina servohidráulica, de las probetas estándar y miniatura, utilizando el procedimiento de una sola probeta descrito en la norma ASTM E1820^[1]. La curva CTOD-R se define como los datos ubicados en la región limitada por los ejes coordenados y por el δ_{max} y Δa_{max} . Estos últimos establecen los límites de validez de la capacidad de medición del espécimen en la curva CTOD-R, el

límite superior para lo cual es definido por la máxima capacidad δ para un espécimen estándar está dado por $\delta_{max} = b_0/20$ y la máxima extensión de grieta para este mismo espécimen es $\Delta a_{max} = 0,25b_0$

Para las probetas estándar el valor nominal de δ_{max} es de 1,25 mm, mientras el valor nominal de Δa_{max} es alrededor de 6,25 mm. Por consiguiente, el δ_{max} y Δa_{max} están limitados por el ligamento inicial del espécimen. Los especímenes miniatura no cumplen con los requerimientos de la norma en este estudio.

Los CTOD se determinaron a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_{(i)} = \frac{K_{(i)}^2(1-\nu^2)}{2\sigma_0 E} + \frac{[r_{p(i)}(W - a_{(i)}) + \Delta a]V_{pl(i)}}{[r_{p(i)}(W - a_{(i)}) + a_{(i)} + z]} \quad (1)$$

donde, los parámetros $V_{pl(i)}$ y z se miden durante la prueba; $V_{pl(i)}$ es el desplazamiento plástico, que es el desplazamiento de abertura total menos el desplazamiento por deformación plástica y se determina por el software de prueba, a partir de la medición del desplazamiento de abertura en la cara frontal, si la probeta es miniatura, y en la línea de carga, si es probeta estándar; mientras que z es la distancia del punto donde se coloca el extensómetro a la línea de carga; $z = 0$ para la probeta estándar y $z = 3,96$ mm para la probeta miniatura.

La ecuación de las líneas de construcción y de exclusión a 0,15 y 1,5 mm fue $\delta = 2\Delta a$. La línea de desplazamiento 0,2 mm fue la usada para determinar el valor de δ_{IC} , que corresponde a la intersección de la ecuación $\delta = 2\Delta a$ que emerge del valor de $\Delta a = 0,2$ mm con la curva δ , vs. Δa , que se representa por la siguiente ley de potencia.

$$\delta = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (2)$$

donde, los coeficientes C_1 y C_2 se obtuvieron del ajuste con los datos experimentales.

Una vez realizado el ensayo de la curva CTOD, se hizo el tinte térmico a la probeta para delimitar la zona de pregrieta por fatiga, la zona de crecimiento estable (Δa) y la zona de fractura final. La figura 7 muestra la apariencia de la superficie de fractura de una probeta de tenacidad miniatura después del ensayo y con el tinte térmico.

3. RESULTADOS

3.1. Ensayos de tracción uniaxial

Para establecer si hay diferencias estadísticas significativas entre los resultados de las pruebas con

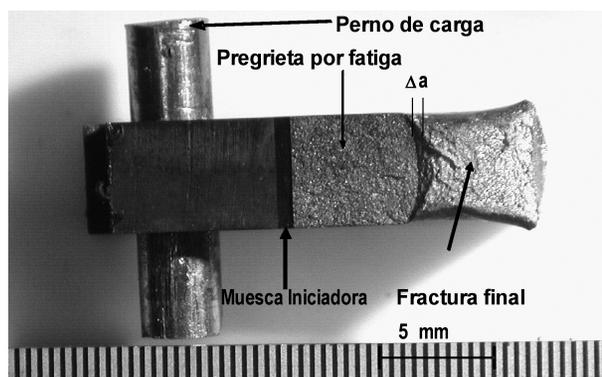


Figura 7. Superficie de fractura de la probeta de tenacidad miniatura.

Figure 7. Fracture's Surface of the tension compact miniature sample.

especímenes de diferentes orientaciones y tamaños se utilizó la prueba *t Student*^[24], que consiste en la comparación de medias de dos muestras independientes de pocos especímenes. Primero, se determinó si las varianzas de los grupos de pruebas eran iguales o diferentes, para seleccionar la ecuación adecuada para calcular *t*. La hipótesis nula es la igualdad de medias, que significa que no hay efecto del tamaño o la orientación, según el caso; si *t* calculada es igual o menor que *t* teórica se verifica la hipótesis nula y viceversa. El análisis *t Student* se hizo con nivel de confianza de 95 %, en todos los casos. En las tablas III y IV se muestran los resultados de la prueba *t Student*, para el límite elástico y la resistencia última en las pruebas de tracción uniaxial. Se comparan los efectos del tamaño y la orientación entre probetas estándar (std), entre las estándar y las miniaturas (mini) en las direcciones longitudinales (L) y circunferencial (C) y entre la orientación corta radial (R) con las demás orientaciones de las probetas miniatura.

Los resultados muestran diferencias significativas entre las direcciones L y C de las probetas estándar, encontrando que el promedio del límite elástico en la orientación C fue 8,4 % mayor que en la orientación L y la resistencia última en la orientación C fue 3,26 % mayor que en la orientación L. Comparando los valores del límite elástico entre probetas miniatura con probetas estándar en la orientación L, fueron 12 % mas altos en las probetas miniatura que en las estándar. En la orientación C no hubo diferencias significativas entre los dos tamaños de probeta.

Un resultado significativo de ésta investigación es que se pudieron determinar las propiedades de tracción uniaxial en la orientación R con probetas miniatura. Los resultados muestran que la resistencia a la tracción en la orientación R es la mas débil de las tres direcciones principales del tubo, con un límite

Tabla III. Prueba t de una cola para dos muestras independientes del límite elástico (σ_{ys}) con $\alpha_1=0,05$

Table III. T test of one tail for two independent samples of the yield stress (σ_{ys}) with $\alpha_1=0,05$

Comparación	Estadístico F_0	Valor crítico F_C	H_0 : Varianzas Iguales	φ	Estadístico t_0	Valor crítico de t_C	H_0 : Medias Iguales	H_1 : Hipótesis Alternativa	P
Lstd vs. Cstd	1,36	6,38	Aceptada	8	-14,32	$\pm 2,36$	Rechazada	$m_1 < m_2$	0,000
Lstd vs. Lmini	68,15	6,38	Rechazada	4	-3,88	$\pm 2,31$	Rechazada	$m_1 < m_2$	0,009
Cstd vs. Cmini	111,59	6,38	Rechazada	4	-1,23	$\pm 2,31$	Aceptada	$m_1 < m_2$	0,143
Cmini vs. Lmini	2,22	6,38	Aceptada	8	0,01	$\pm 2,31$	Aceptada	$m_1 > m_2$	0,494
Rmini vs. Lmini	2,04	3,84	Aceptada	11	-6,71	$\pm 1,78$	Rechazada	$m_1 < m_2$	0,000
Rmini vs. Cmini	4,55	3,84	Rechazada	4	-4,31	$\pm 2,02$	Rechazada	$m_1 < m_2$	0,004

Tabla IV. Prueba t de una cola para dos muestras independientes de resistencia última (σ_U) con $\alpha_1=0,05$.

Table IV. T test of one tail for two samples independent of the ultimate resistance (σ_U) with $\alpha_1=0,05$.

Comparación	Estadístico F_0	Valor crítico F_C	H_0 : Varianzas Iguales	φ	Estadístico t_0	Valor crítico de t_C	H_0 : Medias Iguales	H_1 : Hipótesis Alternativa	P
Lstd vs. Cstd	4,03	6,38	Aceptada	8	-8,92	$\pm 2,57$	Rechazada	$\mu_1 < \mu_2$	0,000
Lstd vs. Lmini	2,59	6,38	Aceptada	8	-3,88	$\pm 2,31$	Rechazada	$\mu_1 < \mu_2$	0,002
Cstd vs. Cmini	77,63	6,35	Rechazada	4	-0,62	$\pm 2,31$	Aceptada	$\mu_1 < \mu_2$	0,284
Cmini vs. Lmini	7,41	6,38	Rechazada	4	1,15	$\pm 2,31$	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,152
Rmini vs. Lmini	0,11	0,17	Aceptada	11	-4,42	$\pm 1,78$	Rechazada	$\mu_1 > \mu_2$	0,000
Rmini vs. Cmini	0,82	0,17	Rechazada	4	-4,89	$\pm 1,80$	Rechazada	$\mu_1 > \mu_2$	0,000

elástico 24 % menor que en la orientación L y 22 % menor que en la C, comparando entre probetas miniatura. Este resultado es similar si se comparan las probetas estándar con la miniatura; sin embargo, aquí se debe considerar también el efecto del tamaño descrito en el párrafo anterior.

3.2. Flexibilidad

Cabe recordar que uno de los principales problemas de este trabajo fue la calibración de la función flexibilidad y de la función δ , vs. Δa , de la probeta miniatura. En la tabla V se muestran las longitudes iniciales y finales de la grieta en las probetas CT miniatura, medidas y calculadas con la función flexibilidad. La longitud de grieta final medida fue corregida por la curvatura que presenta el frente de propagación. La corrección es el valor promedio de la longitud de grieta final medida en la superficie de fractura y la longitud de grieta final medida en la cara lateral de la

probeta. Se recalcularon con correcciones las longitudes de grieta, en todos los puntos anteriores a la longitud de grieta final, excepto en la longitud de grieta inicial ya que no presenta curvatura siendo los datos que se ofrecen en la tabla V, donde se muestra también el error relativo entre la longitud de grieta inicial y final por flexibilidad y el medido corregido por curvatura. El error promedio de la longitud de grieta por flexibilidad, para todos los casos, es menor del 2,5 %.

En la figura 8 se muestran las flexibilidades (V/P) de las probetas CT miniatura obtenidas por los métodos experimental y numérico realizados en el presente trabajo, así como el hallado por Saxena^[23]. En este último se utilizaron las expresiones matemáticas para una probeta normalizada, estimando el desplazamiento de la abertura de la grieta en la cara frontal. De este resultado, se observa que la pendiente estimada en la probeta estándar está por debajo de las correspondientes a las microprobetas y, por lo tanto, existe una sobreestimación de la longitud de la grieta.

Tabla V Resultados de las longitudes de grieta corregidos por curvatura de las probetas de tenacidad miniatura.

Table V Results of the longitudes of the crack corrected by the curvature of the tension compact miniature samples.

Probeta	B (mm)	Longitud de grieta inicial, a ₀ , mm			Longitud de grieta final, a _f , mm		
		Física	Complianza	% Error	Física	Complianza	% Error
RL1	5,35	5,19	5,38	+3,55	9,67	9,98	+3,07
RL4	5,34	5,53	5,61	+1,43	9,97	10,01	+0,40
LT4	5,32	5,36	5,41	+0,92	10,08	10,00	-0,75
TL1	5,31	6,50	6,40	-1,57	10,59	10,95	+3,27
RC11	5,33	5,11	5,18	+1,28	10,51	10,50	-0,13
RC21	5,33	5,02	5,16	+2,79	9,44	9,76	+3,27
RL21	5,30	4,99	5,50	+8,44	9,49	9,75	+2,66

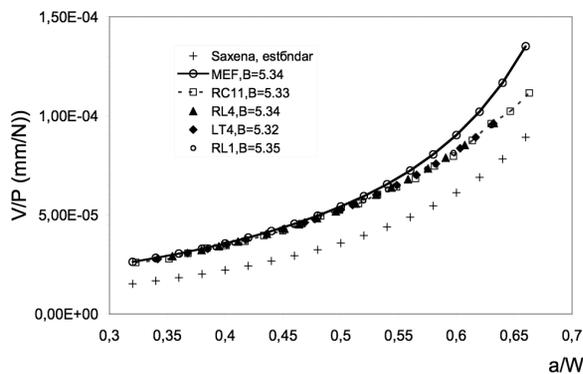


Figura 8. Gráfica comparativa de complianza obtenida por diferentes métodos.

Figure 8. Comparative compliance graph obtained through different methods.

La figura 9 muestra la función de transferencia U_x contra a/W determinada aquí y a partir de la cual se obtienen los coeficientes de la función polinomial de calibración de tamaño de grieta. La función de transferencia de las probetas miniatura es la misma que para las probetas estandarizas, pero los coeficientes del polinomio son diferentes. En este estudio, los coeficientes del polinomio de la función de tamaño de grieta se obtuvieron a partir de los datos de la figura 9. La expresión de la función flexibilidad para las probetas miniatura obtenida aquí es:

$$\frac{a}{W} = 8,9021 U_x^2 - 6,7029 U_x + 1,1421 \quad (3)$$

El intervalo de validez de esta ecuación es $0,35 \leq a/W \leq 0,60$, que corresponde los tamaños de grieta

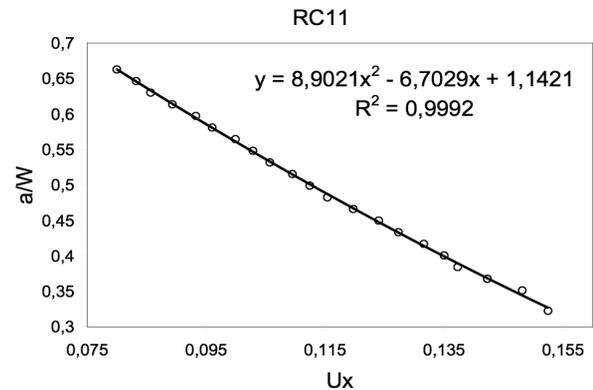


Figura 9. Gráfica de los coeficientes de la complianza experimental.

Figure 9. Experimental compliance coefficients graph.

que se obtuvieron en las pruebas de propagación de grietas por fatiga.

3.3. Medición de tenacidad a la fractura

3.3.1. Curvas carga, versus desplazamiento

Las figuras 10 y 11 muestran algunas curvas del V, vs. P, de las probetas estándar y miniatura. Se observa que se requiere, aproximadamente, 20 veces menos carga para romper una probeta miniatura que una probeta estándar, lo que puede ser una ventaja si solo se cuenta con una máquina de baja capacidad para realizar la prueba. La forma de las curva es tal como se espera, para una prueba válida; adicionalmente, se

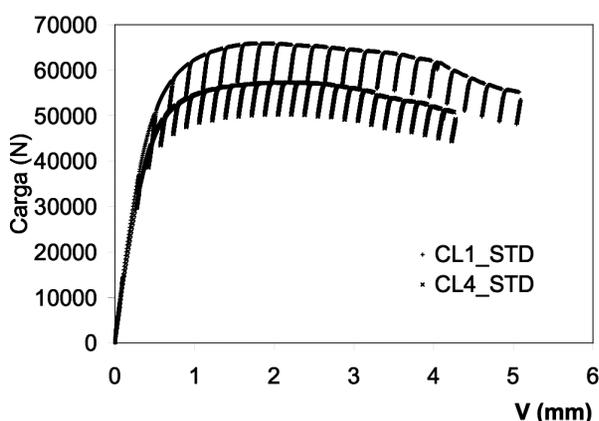


Figura 10. Curva carga, versus desplazamiento, de la probeta estándar en la orientación CL.

Figure 10. Load curve, versus displacement of the standard sample in longitudinal orientation (CL).

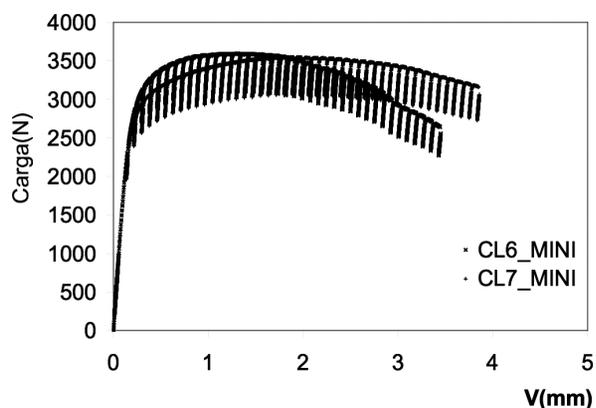


Figura 11. Curva carga, versus desplazamiento, de la probeta miniatura en la orientación CL.

Figure 11. Load curve versus, displacement of the miniature specimen in orientation (CL).

observa que la curva para las probetas miniatura tiene una caída de carga en la región no lineal, menor que la curva de las probetas estándar.

3.3.2. Curvas CTOD-R

Las curvas CTOD-R de las probetas estándar y miniatura en las diferentes orientaciones de placa se muestran en las figuras 12 a 17. En la tabla VI se muestran los valores promedio de tenacidad a la fractura de las diferentes orientaciones; CL, LC, RL y RC, expresada como δ_{IC} y convertidos a $K_{\delta_{IC}}$ mediante la siguiente expresión:

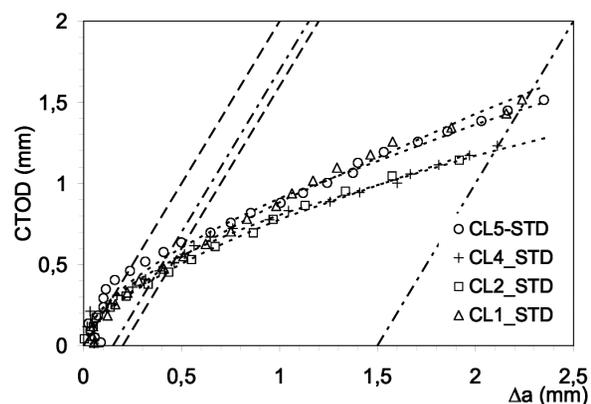


Figura 12. Curva CTOD-R de probetas estándar en la orientación CL.

Figure 12. CTOD-R curve for standard specimens orientation (CL).

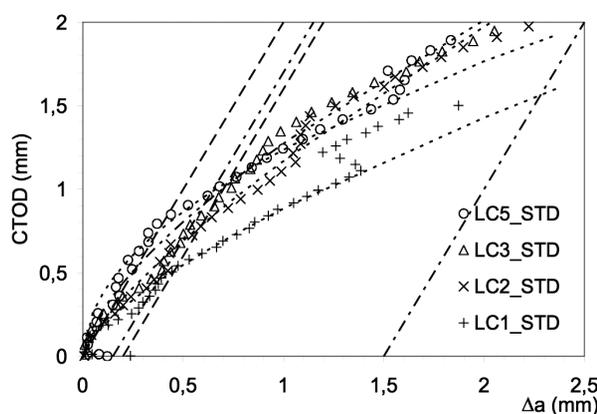


Figura 13. Curva CTOD-R de probetas estándar en la orientación LC

Figure 13. CTOD-R curve for standard specimens orientation (LC).

$$K_{\delta_{IC}} = \sqrt{E' \sigma_{ys} \delta_{IC}} \quad (4)$$

Para las probetas estándar, se consideró deformación plana y para las probetas miniatura, esfuerzo plano. Esta última consideración se hizo con base en el hecho de que las probetas miniatura no cumplen con el criterio de validez para deformación plana establecido en la norma ASTM E 1820 [1], que es dado por:

$$b_0 \geq 35 \delta_Q \quad (5)$$

La condición de esfuerzo plano de las probetas miniatura se verifica al observar la formación de un cuello lateral en las probetas ensayadas, como se puede

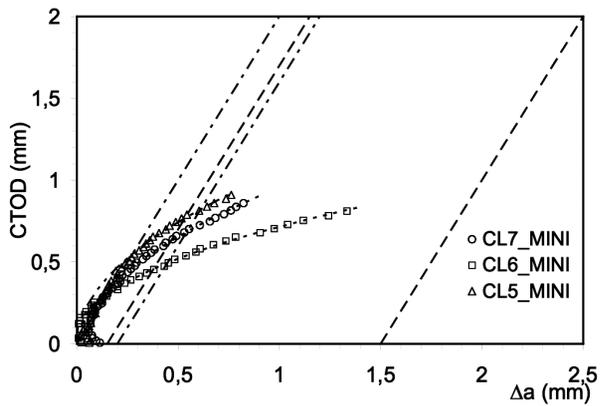


Figura 14. Curva CTOD-R de probetas miniatura en la orientación CL.

Figure 14. CTOD-R curve for miniature specimens circumferential longitudinal orientation (CL).

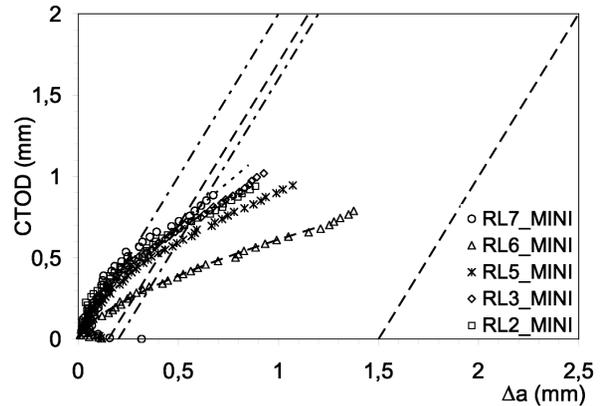


Figura 16. Curva CTOD-R de probetas miniatura en la orientación RL.

Figure 16. CTOD-R curve for miniature specimens radial longitudinal orientation (RL).

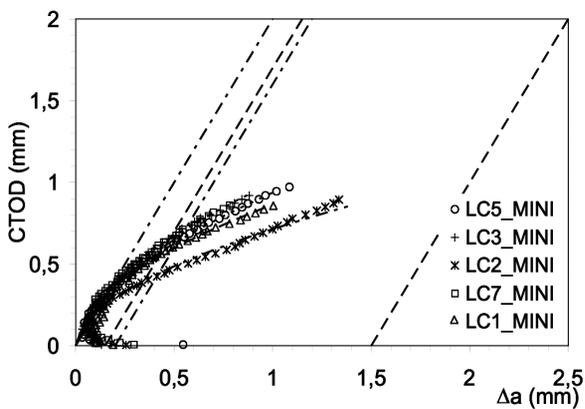


Figura 15. Curva CTOD-R de probetas miniatura en la orientación LC.

Figure 15. CTOD-R curve for miniature specimens longitudinal circumferential orientation (LC).

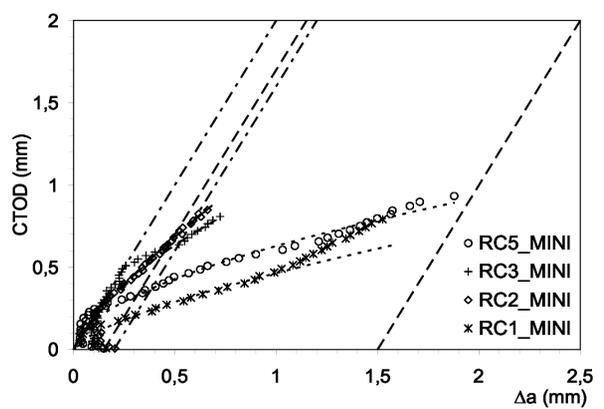


Figura 17. Curva CTOD-R de probetas miniatura en la orientación RC.

Figure 17. CTOD-R curve for miniature specimens radial circumferential orientation (RC).

Tabla VI. Valores promedio de la tenacidad a la fractura obtenida en las probetas estándar y miniatura por la curva R.

Table VI. Average values of fracture toughness obtained from the standard and miniature samples by the R curve.

Probeta	$\frac{n}{\bar{x}}$	W \bar{x} (mm)	B \bar{x} (mm)	$\frac{d\Delta}{da}$ \bar{x}	Δ_{IC} \bar{x} (mm)	K_{SIC} (MPa m ^{1/2}) \bar{x}	$\frac{K_{SIC}}{s}$	% C.V.
CLstd	4	50,00	24,03	0,61	0,52	226,96	18,99	8,36
LCstd	4	50,00	24,03	0,65	0,84	261,95	32,63	12,45
CLmini	3	15,83	5,31	0,47	0,70	242,34	31,28	12,90
LCmini	5	15,83	5,32	0,55	0,61	222,02	23,13	10,41
RLmini	4	15,83	5,32	0,66	0,63	211,15	36,61	17,33
RCmini	4	15,83	5,25	0,67	0,50	188,12	49,59	26,36

ver en la figura 7, el cual no se observa en las probetas estándar.

Nuevamente, se realizó la prueba *t Student*, con un nivel de significancia del 95 %, para determinar la validez estadística de las comparaciones de los valores promedio de las tenacidades a la fractura medidas. Se observa que la tenacidad a la fractura es 15 % más alta en la orientación LC que en la orientación CL, en las probetas estándar. En cambio, las probetas miniatura muestran que la tenacidad a la fractura es 9 % más alta en la orientación CL que en la orientación LC. El valor mas bajo de tenacidad a la fractura se da en la probeta miniatura RC; un resultado que es consistente con los resultados de los ensayos de tracción uniaxial descritos en la sección anterior; el resto de las comparaciones se hará en la sección de discusión de resultados. Otro punto importante son las pendientes de las curvas CTOD-R; las pendientes de las curvas de las probetas estándar en las orientaciones CL y LC son mas altas que las de las probetas miniatura ensayadas en las mismas orientaciones; las pendientes de las orientaciones LC son mas altas que en las orientaciones CL en ambos tamaños de probeta, pero las pendientes de curvas CTOD-R de las probetas miniatura en la orientación corta (RL y RC) son las más altas de todas, tanto de las probetas miniatura, como de las estándar.

De manera similar a como se determinó la significancia estadística del tamaño y orientación en las pruebas de tracción, se evaluó la validez estadística de las diferencias de la tenacidad a la fractura, en función del tamaño y orientación de las probetas mediante la prueba *t Student*. Los resultados que se muestran en la tabla VII, donde se demuestra, estadísticamente, que si existe un efecto de la orientación

entre las probetas estándar, mientras que no se encontró un efecto de la orientación entre las probetas miniatura, con excepción de la orientación RC, cuya tenacidad a la fractura fue significativamente menor que en las otras orientaciones y, de hecho, fue la mas baja de todas las tenacidades medidas, tanto en probetas estándar, como miniatura.

El tamaño tuvo un efecto significativo en la orientación LC, donde la tenacidad a la fractura de la probeta estándar fue mayor que en la probeta miniatura, pero en la orientación CL no se observó una diferencia significativa de las tenacidades a la fractura determinadas en probeta estándar y miniatura.

4. DISCUSIÓN

4.1. Pruebas de tracción uniaxial

4.1.1. Efecto de tamaño

Al comparar el efecto de tamaño en las propiedades mecánicas se observa que en las probetas miniatura tienden a presentar valores más altos que en las probetas estándar. En la orientación longitudinal, el efecto de tamaño consiste en que a menor tamaño de probeta mas resistencia mecánica tiene, aproximadamente del 10 al 13 %. La comparación de probetas estándar con las miniatura en la orientación circunferencial, muestra que hay dispersión en los resultados, los cuales presentan diferencias estadísticas no significativas en la prueba *t de Student*. Tómese en cuenta que se ensayaron, al menos, tres probetas por cada orientación y, dada la homogeneidad de la placa, se puede considerar que si son

Tabla VII. Prueba t de una cola para dos muestras independientes de tenacidad a la fractura ($K_{\delta IC}$ (MPa m^{1/2}) con $\alpha_1=0,05$.

Tabla VII. T-test of one tail for two samples independent of the fracture toughness ($K_{\delta IC}$ (MPa m^{1/2}) with $\alpha_1=0,05$.

Comparación	Estadístico F_0	Valor crítico F_C	H_0 : Varianzas Iguales	φ	Estadístico t_0	Valor crítico de t_C	H_0 : Medias Iguales	H_1 : Hipótesis Alternativa	P
CLstd vs. LCstd	2,95	9,11	Aceptada	7	-1,89	± 1,89	Rechazada	$\mu_1 < \mu_2$	0,050
CLstd vs. CLmini	2,71	9,55	Aceptada	6	-1,39	± 1,94	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,107
LCstd vs. LCmini	1,99	6,38	Aceptada	8	2,23	± 1,86	Rechazada	$\mu_1 > \mu_2$	0,028
CLmini vs. LCmini	1,82	6,94	Aceptada	7	1,69	± 1,89	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,067
CLmini vs. RLmini	1,36	19,24	Aceptada	7	1,83	± 1,89	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,055
CLmini vs. RCmini	2,51	19,16	Aceptada	6	2,18	± 1,94	Rechazada	$\mu_1 > \mu_2$	0,036
LCmini vs. RLmini	2,50	6,38	Aceptada	8	0,56	± 1,86	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,295
LCmini vs. RCmini	4,60	6,59	Aceptada	7	1,37	± 1,89	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,106
RLmini vs. RCmini	1,84	6,59	Aceptada	7	0,80	± 1,89	Aceptada	$\mu_1 > \mu_2$	0,224

representativas. Otro aspecto importante que se observa en los resultados es que el porcentaje de elongación cambia con el tamaño, reduciéndose hasta un 2 % en promedio con respecto a las probetas estándar. Por lo general, las probetas miniatura presentan mayor dispersión, pues los coeficientes de variación son más altos. Esta dispersión, probablemente, se puede explicar a causa de un efecto combinado del material (la orientación y el contenido relativo de inclusión definido como la razón de la fracción área de inclusión con respecto al área total de la probeta) y alguna deformación no homogénea o mediante el proceso de endurecimiento y posterior recuperación en las zonas de mayor deformación de las probetas ensayadas^[25]. Sin embargo, para poder separar tales efectos se requiere aumentar el número de ensayos y controlar la variación de estas características entre los dos grupos de probetas. Cabe destacar que la comparación de los resultados obtenidos aquí con los de un estudio similar realizado en acero 1020 ^[25], muestra concordancia, en el sentido que las propiedades mecánicas se incrementan en los especímenes más pequeños con respecto a los especímenes más grandes.

4.1.2. Efecto de la orientación

En las pruebas de tracción uniaxial se observaron diferencias significativas entre las dos orientaciones de las probetas estándar, donde el límite elástico y resistencia última mostraron diferencias de 8,37 % y 3,26 % menores en la orientación longitudinal que en la orientación circunferencial. Así mismo, el coeficiente de variación es más alto en la orientación circunferencial con respecto a la orientación longitudinal.

Al comparar los resultados de las pruebas de tracción, las probetas miniatura en la orientación longitudinal con respecto a la orientación circunferencial muestra la misma tendencia que en las probetas estándar, es decir, la orientación circunferencial tiende a tener valores más altos, pero las probetas miniatura en la orientación corta muestran valores más bajos, del orden del 24,64 % en el límite elástico y del 9,47 % de resistencia última, con respecto al promedio de las otras direcciones.

Las variación de las propiedades mecánicas en las distintas orientaciones se atribuye al efecto de la anisotropía direccional, donde la orientación relativa de la perlita bandeada y las inclusiones con respecto a la dirección de la deformación principal y el plano de fractura^[26]. Probablemente, en las probetas miniatura la anisotropía direccional es más significativa por el menor tamaño de la sección transversal.

4.2. Flexibilidad

Con las pendientes obtenidas con el método numérico, mediante simulaciones a carga constante y diferentes longitudes de grieta, se determinaron los coeficientes del polinomio de la función de flexibilidad. Resulta que la pendiente estimada por elementos finitos de las microprobetas, coincide con los datos experimentales para valores menores de $a/W = 0,55$; por encima de esta relación, los valores de longitudes de grietas son menores a los obtenidos en el experimento. Esta desviación se atribuye al hecho de que en la simulación numérica se supuso una grieta perfectamente plana y sin curvatura en el frente, además de que se consideró un estado de esfuerzo plano, mientras que en las probetas reales el frente de grieta es curvo y la probeta está en un estado combinado de esfuerzo plano en las superficies y de deformación plana en la parte media del espesor.

En la figura 9 se muestran los coeficientes de la flexibilidad medida experimentalmente junto con la gráfica que ajusta los valores experimentales. Este polinomio es de segundo orden y muestra muy buena correlación, en contraste con el polinomio de quinto orden utilizado para las probetas normalizadas, con el cual no se logró una buena correlación, tendiendo a sobreestimar los valores de tamaño de grieta en función del CTOD; esto, a pesar de que la función de transferencia fue la misma para ambos casos. Los coeficientes de la flexibilidad de la probeta miniatura fueron estimados después de corregir el tamaño de la grieta por el efecto de la curvatura, y considerando la diferencia entre la grieta final medida en la superficie de fractura de la probeta al final de la prueba y el valor medido en la cara lateral de la probeta. Se estimó un error relativo promedio menor del 2,5 %, entre la medición de la longitud de la grieta en la superficie de fractura de la probeta y la medición obtenida con el método de la flexibilidad. Este es uno de los criterios que demuestran la validez del método de prueba de las probetas miniatura.

4.3. Tenacidad a la fractura

4.3.1. Efecto de tamaño

El efecto de tamaño en las pruebas de tenacidad a la fractura se observa entre la probeta estándar y la miniatura en la orientación CL, ya que se espera mayor tenacidad en las probetas miniatura. Sin embargo, la orientación LC muestra un efecto contrario al esperado. Esta inconsistencia, al menos en éste trabajo, se atribuye a la dispersión de los datos en la parte baja de la curva CTOD-R de las probetas miniatura (Figs.

14-17). Esta dispersión, probablemente, es debida a las variaciones de carga en la prueba, a causa de que las cargas, por si mismas, son muy bajas y, por tanto, muy susceptibles de variar. Otra causa de variación puede ser la variabilidad de la medición de la abertura de grieta y, finalmente, también puede deberse a diferencias en la longitud de grieta al inicio de la prueba, causadas por el fenómeno de cerradura de grieta. Al parecer todas estas variaciones enmascaran el efecto de tamaño, por lo que sería conveniente mejorar la precisión de la medición de longitud de grieta y de las cargas para minimizar tales variaciones y medir con mayor confianza la tenacidad a la fractura.

Al considerar la validez de las pruebas de CTOD-R se observaron tres aspectos principales:

- La forma de las curvas carga, *vs.* desplazamiento de la abertura de la grieta, las cuales presentan una región lineal y una región no lineal cuando el material se deforma plásticamente.
- La apariencia de la probeta al final de la prueba, en la que el plano de fractura tiene una sola orientación perpendicular a la línea de carga, sin ramificaciones y con el frente de grieta ligeramente curvo, pero no excesivo.
- Finalmente, las curvas CTOD-R presentan una tendencia típica característica de este tipo de prueba cuando se realiza con probetas estándar.

4.3.2. Efecto de la orientación

El análisis estadístico con la prueba *t Student* presenta diferencias significativas entre las probetas estándar. Este resultado muestra la existencia de un efecto de la orientación. Se puede considerar razonable este efecto, pues el avance del crecimiento de grietas es perpendicular a las cargas aplicadas y ya que las propiedades en tracción son paralelas a éstas, se espera una relación inversa entre las propiedades en tracción uniaxial con la tenacidad a la fractura. Como la aplicación de la carga en la probeta CL es paralela a la orientación circunferencial y sus propiedades en tracción más altas, se espera que su tenacidad disminuya.

La orientación tiene un efecto entre las probetas de tenacidad miniatura: las direcciones cortas son 16 % menos tenaces que las otras orientaciones. Esto, se atribuye a que en las direcciones cortas el eje mayor de las inclusiones esta en el plano de crecimiento de grieta, lo cual produce una menor resistencia al avance de la grieta^[27]. Además, como se demostró en la sección de tracción uniaxial, las orientaciones cortas son las que mostraron menor resistencia.

Al comparar las dos direcciones cortas, no existe un efecto estadísticamente significativo, atribuible

a que son orientaciones similares con respecto a la microestructura y la resistencia a la tracción.

En este trabajo, se observaron diferencias no significativas entre las direcciones miniatura CL y LC, respectivamente. Las gráficas muestran gran dispersión en las curvas CTOD-R.

5. CONCLUSIONES

- El tamaño de probeta mostró un efecto más consistente en las propiedades de tracción en la orientación longitudinal. Las probetas miniatura mostraron valores de resistencia mayores que las estándar (alrededor de 12 % en el límite elástico y 2 % en la resistencia última), pero una menor ductilidad (diferencia del 2 %).
- Las probetas estándar, en la orientación circunferencial, mostraron los valores más altos de propiedades en tracción, con una tendencia similar en las probetas miniatura. Así mismo, en la orientación corta, las probetas miniatura mostraron menor resistencia que en las otras direcciones.
- El método desarrollado en éste estudio, para la estimación de la función flexibilidad para las probetas de tenacidad miniatura, mostró ser adecuado. El máximo error de la medición de la longitud de grieta, la medida en la superficie de fractura y la medición realizada con la función de flexibilidad, fue menor al 2,5 %.
- Las curvas CTOD-R, de las probetas de tenacidad miniatura obtenidas por el método de la flexibilidad, son muy sensibles a las variaciones de la carga, medición de la abertura de la grieta y longitud de grieta, lo que provoca una alta dispersión de datos en la parte baja de la curva CTOD-R.
- El efecto de tamaño en las pruebas de tenacidad a la fractura se observa en las probetas miniatura en la orientación CL, ya que mostraron valores más altos de tenacidad que las estándar. Sin embargo, en la orientación LC el efecto del tamaño es opuesto, presentándose además inconsistencia en la tenacidad a la fractura en esa orientación. A pesar de esta situación, se demuestra que las probetas miniatura en las direcciones cortas son menos tenaces que las otras direcciones.

Nomenclatura

$a_{(i)}$	Longitud de grieta en el ciclo medido
a_0	Longitud de grieta inicial
Δa	Extensión de grieta = $a_{(i)} - a_0$

b_0	Ligamento inicial definido por $b_0 = W - a_0$
B	Espesor total de probeta
B_{eff}	Espesor efectivo de la probeta CT
B_N	Espesor neto de la probeta ($B_N = B$ si no presenta muescas laterales)
C	Valor de la ordenada al origen de la regresión lineal de los valores experimentales de la prueba CTOD
C_2	Valor de la pendiente de la regresión lineal de los valores experimentales de la prueba CTOD
CTOD	Desplazamiento de la abertura de la grieta por sus siglas en inglés
% C.V.	Coefficiente de variación definida por %C.V. = (Desviación estándar/media)*100
E	Modulo de Young
E'	$E = E$ para esfuerzo plano; $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ para deformación plana
F_0	Valor estimado de la distribución F a partir de los resultados por medio de una formula
F_C	Valor crítico de la distribución F estimado en tablas
K	Factor de intensidad de esfuerzos con $a = a_0$
K_{IC}	Tenacidad a la fractura
$K_{\delta\text{IC}}$	Valor de tenacidad a la fractura obtenido a partir del valor de δ
ΔK	Amplitud del factor de intensidad de esfuerzos: $\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$
n	Número de probetas
P_i	Carga
P	Probabilidad al nivel de significancia de $\alpha = 0,05$
$r_{p(i)}$	Factor de rotación plástica = $0.4(1 + \alpha_2)$. $\alpha_{(i)} = 2 \left[\left(\frac{a_{(i)0}}{b_{(i)}} \right)^2 + \frac{a_{(i)}}{b_{(i)}} + \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} - 2 \left(\frac{a_{(i)}}{b_{(i)}} + \frac{1}{2} \right)$
S	Desviación estándar de los resultados experimentales
t_0	Valor estimado de la distribución t a partir de los resultados por medio de una formula
t_C	Valor crítico de la distribución t estimado en tablas
U_X	Función de transferencia: $\frac{1}{\sqrt{\frac{B_{\text{elf}} E' V}{P} + 1}}$
V	Desplazamiento de abertura de grieta en el borde de la entalla
$V_{p(i)}$	Desplazamiento plástico en la abertura de la grieta en el ciclo medido
W	Ancho de la probeta CT
\bar{x}	Valores promedios

z	Distancia del punto de medición donde se coloca el extensómetro a la línea de carga.
α_1	Nivel de confianza en la prueba de hipótesis
δ	CTOD
δ_Q	Valor provisional de tenacidad a la fractura
δ_{IC}	CTOD crítico de acuerdo a la norma ASTM E-1820
μ	Valores promedios para la prueba t de student
ν	Relación de Poisson = 0,3
σ_{ys}	Límite elástico 0,2
σ_{UTS}	Resistencia última
ϕ	Grados de libertad para las pruebas de hipótesis

REFERENCIAS

- [1] ASTM STANDARD E 1820-01, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, ASTM Standards on Disc, Vol.03.01, West Conshohocken, Philadelphia, 2001, pp. 17-18; 27-29.
- [2] ASTM STANDARD E 813-89, *Standard Test Method for J_{IC} A Measure of Fracture Toughness*, ASTM Standards, Vol.03.01, 1990, pp. 702-707.
- [3] L.M. BARKER, *Int. J. Fract.* 15 (1979) 515-536.
- [4] X.C. YIN Y T.G. CHEN, *J. Test. Eval.* 20 (1992) 239-247.
- [5] H.J SCHINDLER Y M. VEIDT, *Fracture toughness Evaluation From Instrumented Sub-Size Charpy-Type Tests*, Small Specimen Test Technnique, ASTM 1329, W.R. Corwin, S. T. Rosinski, y E. van Walle, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998, pp. 48-62.
- [6] W. SCHMITT, H. TALJA, W. BÖHME, S. OESER S Y H. STÖCKL, *Characterization of Ductile Fracture toughness Based on Subsized Charpy and Tensile Test Results*, Small Specimen Test Technnique, ASTM 1329, W.R. Corwin, S. T. Rosinski, y E. van Walle, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998, pp. 63-81.
- [7] H. TALJA, Tesis de Doctorado, Technical Research Centre of Finland, 1998.
- [8] D. HELLMANN Y K.H. SCHWALBE, *J. Test. Eval.* 14 (1986) 292-297.
- [9] G. I. BARENBLATT, *Scaling Phenomena in Fatigue and Fracture*. Lawrence Berkeley National Laboratory (University Of California), 2004, pp.1-21. URL <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-56765>.
- [10] R.O. RITCHIE, *Int. J. Fract.* 132 (2005) 197-203, URL: www.lbl.gov/Ritchie/Library/PDF/ROR-IJF05-scaling.pdf

- [11] S.K. PUTATUNDA, J.M. RIGSBEE Y H.T. CORTEN, *J. Test. Eval.* 13 (1985) 181-190.
- [12] S.K. PUTATUNDA, *J. Test. Eval.* 14 (1986) 49-57.
- [13] N.F. PANAYOTOU, S.D. ATKIN, R.J. PUIGH Y B.A. CHIN, *Design and Use of Nonstandard Tensile Specimens for Irradiated Materials Testing*. The use of small scale specimens for testing irradiated material, ASTM STP 888. W.R. Corwin y G. E. Lucas, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 1986, pp. 201-219.
- [14] F.H. HUANG, *Use of subsized specimens for evaluating the fracture toughness of irradiated materials*, The use of small scale specimens for testing irradiated material, ASTM STP 888. W.R. Corwin y G. E. Lucas, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 1986, pp. 290-304.
- [15] F.H. HUANG, *J. Test. Eval.* 13 (1985) 257-264.
- [16] D.J. ALEXANDER, *Fracture Toughness Measurements with Subsize Disk Compact Specimens*, Technical Report 1992, pp. 1-28. URL: ww.osti.gov/servlets/purl/104508-IV57sC/webviewable.
- [17] W. P. A. BELCHER Y S. G. DRUCE, *Micromechanisms of Ductile Stable Crack Growth in Nuclear Pressure Vessel Steels*, Elastic Plastic Fracture Second Symposium, Volume II- Inelastic Crack Analysis. ASTM STP 803, C.F. Shih y J. P. Gudas, Eds., American Society for Testing and Materials, 1983, pp. II-739-II-762.
- [18] J.C LAUTRIDOU Y A. PINEAU, *Eng. Fract. Mech.* 15 (1981) 55-71.
- [19] T.L. ANDERSON, *Fracture Mechanics*, CRC Press., Boca Raton, Florida, EEUU, 1991, pp. 194-198.
- [20] H. A. ERNST, *Material Resistance and Instability Beyond J-Controlled Crack Growth*, Elastic Plastic Fracture Second Symposium, Volume I- Inelastic Crack Analysis. ASTM STP 803, C.F. Shih y J. P. Gudas, Eds., American Society for Testing and Materials, 1983, pp. I-191-I-213.
- [21] J.S. SOLECKI, *Fracture mechanics*, Swanson Analysis Systems, Inc. Houston. Pa. E.E.U.U. 1989, pp. 4.20-4.37.
- [22] ASTM STANDARD E 647-00, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM Standards on Disc, Vol.03.01. West Conshohocken, Philadelphia, 2001, pp. 5-13.
- [23] A. SAXENA Y S.J. JR. HUDAK, *Int. J. Fract.* 14 (1978) 453-468.
- [24] R. JOHNSON, *Estadística Elemental*, Grupo Editorial Iberoamérica, México, D.F., 1990, pp. 365-371,
- [25] G. DÍAZ, A. ARTIGAS, V. MARTÍNEZ Y P. KITTL, *A statistical analysis of mechanical properties and size effect in AISI 1020 and AISI 1045 steels subjected to traction*. Applied Mechanics in the Americas, V6, pp 463-466, edited by H.I. Weber, P.B. Gonsalvez, I. Jasiuk, D. Pamplona, C. Steele and L. Bevilacqua, Published by AAA and ABCM. Río de Janeiro, 1999.
- [26] W.A. SPITZIG Y R.J. SOBER, *Metall. Trans.* 12A (1981) 281-291.
- [27] D. BROEK, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, Países Bajos, 1982, pp.304-309.