

Comportamiento a Fractura para las Tuberías de Polietileno de Alta Densidad Aplicando el Método del Desplazamiento de la Apertura del frente de Grieta (*CTOD*).

*Raúl Machado*¹, *Marco González*², *Jeanette González*³

rmachado.unefm@gmail.com¹, margdleon@usb.ve², jjgonza@usb.ve³

Grupo de Investigación de Diseño Mecánico, UNEFM, Coro, Venezuela¹

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela²³

Resumen

Esta investigación se basa en un estudio experimental de mecánica de fractura que determinó el comportamiento mecánico a fractura en tuberías de PE-100 y PE-80. Los ensayos se realizaron en muestras de tuberías de PEAD obtenidas directamente a partir de tuberías sin ninguna etapa adicional de procesamiento, a fin de lograr una caracterización real del comportamiento en servicio de las mismas. El estudio está enmarcado en ensayos de MFEP aplicando la metodología del *CTOD*, estableciendo las consideraciones y criterios requeridos según las normas ASTM y *ESIS*. Los resultados experimentales permitieron elaborar curvas δ vs. Δa para caracterizar el comportamiento mecánico de las tuberías de PE-100 y PE-80 en la dirección de los esfuerzos principales, longitudinal y circunferencial, a la velocidad de 5 mm/min, y para valores de espesor de $8,5 \pm 0,5$ mm y $15,0 \pm 0,5$ mm. Se logró aplicar satisfactoriamente en polímeros el procedimiento de ensayo de tenacidad a la fractura descrito en la norma ASTM-1820 del *CTOD* para materiales metálicos, lográndose evaluar δ_{IC} para el inicio de crecimiento estable de grieta en 0,2 mm. Además, la determinación de la curva δ_{IC} vs. Δa a través del método de *CTOD* permitió caracterizar la resistencia a la fractura de las tuberías de PEAD en la etapa de enroscamiento de crecimiento estable de la grieta. El material de estas tuberías presentó una alta tenacidad, lo que se traduce en una alta deformación plástica en el frente de la grieta.

Palabras Claves: Análisis experimental, *CTOD*, Curvas δ_{IC} vs. δa , Mecánica de fractura, PEAD, Tuberías.

Fracture Behavior for High Density Polyethylene pipes applying the crack front opening displacement method (*CTOD*).

Abstract

This research is based on an experimental study of fracture mechanics that determined the mechanical behavior to fracture in PE-100 and PE-80 pipes. The tests were carried out on HDPE pipe samples obtained directly from pipes without any additional processing stage, in order to achieve a real characterization of their service behavior. The study is framed in MFEP trials applying the *CTOD* methodology, establishing the considerations and criteria required according to ASTM standards and *ESIS*. The experimental results allowed to elaborate curves δ vs. Δa to characterize the mechanical behavior of PE-100 and PE-80 pipes in the direction of the main, longitudinal and circumferential stresses, at the speed of 5 mm / min, and for thickness values of $8.5 \pm 0, 5$ mm and 15.0 ± 0.5 mm. The fracture toughness test procedure described in the ASTM-1820 standard of the *CTOD* for metallic materials was successfully applied in polymers, evaluating δ_{IC} for the start of stable crack growth at 0.2 mm. Furthermore, the determination of the δ_{IC} vs. Δa through the *CTOD* method allowed to characterize the fracture resistance of HDPE pipes in the stable growth ridge stage of the crack. The material of these pipes presented a high tenacity, which translates into a high plastic deformation in the front of the crack.

Key Words: Experimental analysis, *CTOD*, δ_{IC} vs. Δa curves, Fracture mechanics, HDPE, pipe.

I. INTRODUCCIÓN

La fractura es un fenómeno que ha recibido atención prácticamente desde que se comenzaron a utilizar en gran escala máquinas y sistemas estructurales diseñados para resistir y transmitir una carga o determinada presión. Todo componente estructural siempre estará acompañado del riesgo de fractura, lo cual pudiera implicar pérdidas materiales, económicas y humanas. Se ha demostrado que los criterios tradicionales de diseño para cualquier sistema estructural bajo la suposición de la ausencia de defectos, para después considerar su efecto mediante factores de seguridad, son arriesgados y muchas veces carentes de fundamento. El hecho es que los defectos, y en particular las grietas, aparecen en los sistemas mecánicos y estructurales, ya sea por el proceso de fabricación, instalación o generados durante el servicio, y por lo tanto surge la necesidad de analizar su efecto en el comportamiento mecánico de dichos sistemas [1].

La Mecánica de Fractura es la disciplina que provee las bases y la metodología para el diseño y evaluación de componentes agrietados, a fin de determinar si la grieta es peligrosa y para desarrollar estructuras más resistentes y tolerantes a los defectos. Esta disciplina surgió con las investigaciones de Griffith (1921, 1924) sobre criterios de propagación de grietas en sólidos, basadas en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie, por lo cual se conoce como la formulación energética de la mecánica de fractura. Aunque la mayor parte de los desarrollos y aplicaciones de la Mecánica de Fractura se basaron en los materiales metálicos, en la actualidad se está aplicando en materiales poliméricos cuyo comportamiento a fractura tiene características propias para incluir aspectos tan característicos de los plásticos como los factores que inciden en el proceso de fabricación y que afectan la pieza terminada, además de la viscoelasticidad y la viscoplasticidad que influyen en los procesos de manufactura de sistemas de tuberías [2][3]. En la industria particularmente de manufactura y del reciclaje, el polímero más utilizado por ofrecer diversas mejoras en relación a su flexibilidad y bajo costo es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) [4]. Este material se aplica principalmente en la producción de una gran gama de tuberías para ser utilizadas en sistema de distribución de diversos fluidos, como agua y gas [5][6][7][8].

Recientemente, tales aplicaciones de las tuberías de PEAD tienen una mayor importancia producto de las notables características y la gran versatilidad que

ofrecen en múltiples aplicaciones ingenieriles [6][9], por lo que se torna más urgente y necesario el impulso del desarrollo de estudios fiables que permitan realizar la caracterización del comportamiento mecánico de este tipo de polímero y de la mecánica de fractura. La meta principal de cualquier análisis de la mecánica de fractura (MF) es prevenir la falla, de tal manera que garantice la integridad mecánica de los equipos, disminuyendo así daños y pérdidas económicas [10][11].

Hasta la fecha no se han desarrollado estudios de mecánica de fractura en tuberías de PEAD fabricadas en Venezuela aplicando el método de CTOD [11]. Es por ello que es importante desarrollar el conocimiento del comportamiento mecánico de este tipo de materiales al aplicar ensayos de mecánica de fractura en las pruebas de polímeros, para mejorar la predicción de las fallas en las tuberías, protegiendo así la integridad mecánica de los equipos y sistemas, además de proporcionar una perspectiva más amplia de futuros rangos de aplicación.

II. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

El trabajo desarrollado está enfocado en un estudio experimental que pretende establecer la resistencia a la fractura al inicio de la abertura de la grieta en tuberías elaboradas con Polietilenos de Alta Densidad (PEAD): PE-100 y PE-80. Las especificaciones técnicas de las tuberías utilizadas en la investigación se muestran en la Tabla I. Las tuberías de PEAD son utilizadas en la industria para acueductos, redes de distribución de gas, sistemas de riego e instalaciones industriales. Los tubos ensayados fueron suministrados por la empresa Revinca, C.A.

Ensayos de Mecánica de Fractura

Los ensayos de mecánica de fractura se realizaron con probetas tipo SENB en una máquina de tracción universal modelo Lloyd EZ20 con capacidad máxima de 10 kN a la velocidad de 5 mm/min; el procedimiento para la elaboración de las muestras y los ensayos estuvo regido por los lineamientos indicados en la norma COVENIN 527[12], el Protocolo ESIS[13] y la norma ASTM D-5045[14] para polímeros. En la figura 1 se muestran las dimensiones de las probetas tipo SENB para estos ensayos espesor de $8,5 \pm 0,5$ mm y en la figura 2 se puede observar la disposición de estas probetas en ambas orientaciones (longitudinal y circunferencial) de las tuberías de PEAD.

Tabla I: Especificaciones Técnicas de las tuberías de PEAD.

Material	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	SDR	Presión de Operación (psig)
PE - 100	110	8,5 ± 0,5 / 15,0 ± 0,5	13,6 / 7,4	185 / 360
PE - 80		8,5 ± 0,5 / 15,0 ± 0,5	13,6 / 7,4	150 / 290

Fuente: Polinter, 2017 [7]; Revinca, C.A, 2018 [6]

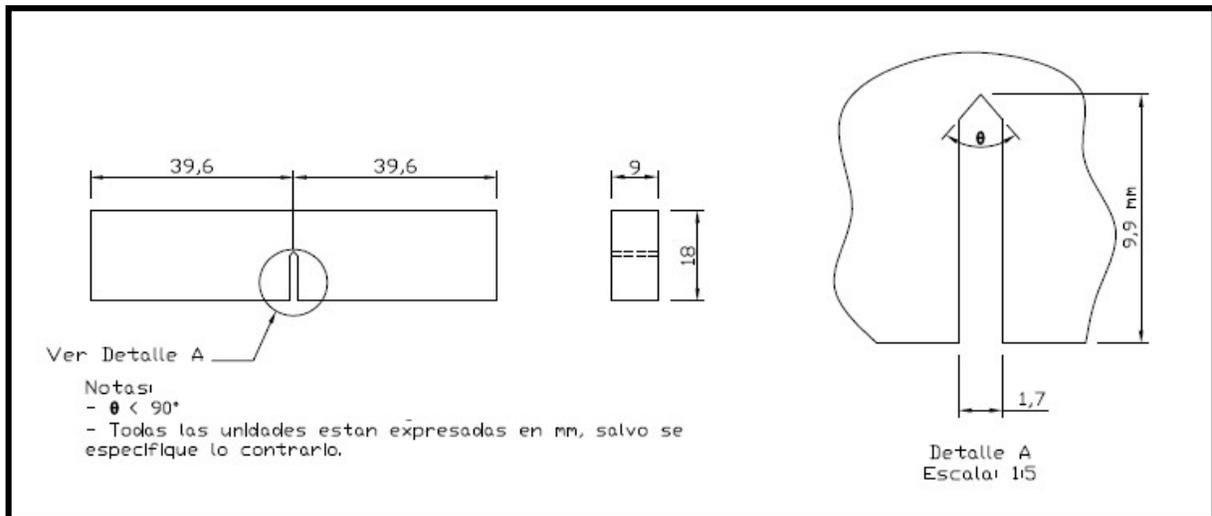


Figura 1: Geometría en mm de la probeta tipo SENB [2]

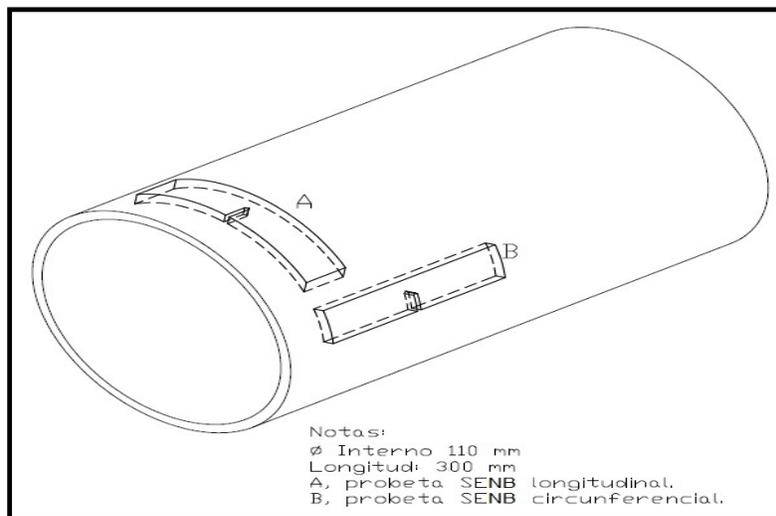


Figura 2: Disposición de las probetas SENB en las tuberías. [15]

Para aplicar el método de CTOD es necesario elaborar las curvas δ_{IC} vs. Δa . Para la obtención de las curvas se determinó la componente plástica (v_P) en el diagrama carga – desplazamiento, valor fundamental para la deducción del CTOD (δ_{IC}). Luego se calculó el factor de intensidad de esfuerzos (K_I), para las muestras de tuberías PEAD PE-100 y PE-80. Se recopilaron datos mediante pruebas de ensayos en flexión en tres puntos (probeta tipo SENB). Una vez determinadas estas variables se calcula cada punto en la curva δ_{IC} vs. Δa con las ecuaciones (1), (2) y (3)[16][17]. Los ensayos y la determinación de la curva δ_{IC} vs. Δa se realizó bajo

los lineamientos de las normas ASTM E-1820[16], ASTM E-1290[17] y ASTM E-561[18].

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2E\sigma_y} + \frac{0,44(W-a)V_p}{0,44W+0,6a} [\text{mm}] \quad (1)$$

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} * Y \quad [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}] \quad (2)$$

$Y = f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ Y es determinado para la probeta de flexión en tres puntos, SE(B)(Single Edge Bend Specimen) con distancia entre apoyos $S= 4W$, de la siguiente manera:

$$Y = \frac{6\left(\frac{a_0}{W}\right)^{1/2} \left(1,99 \frac{a_0}{W} \left[1 - \frac{a_0}{W}\right] \left[2,15 - 3,93 \frac{a_0}{W} + 2,7\left(\frac{a_0}{W}\right)^2\right]\right)}{\left(1 + 2\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \quad (3)$$

La Figura 3 muestra la curva característica de resistencia CTOD (δ_{IC} vs. Δa), donde se especifica el valor de δ_{IC} crítico.

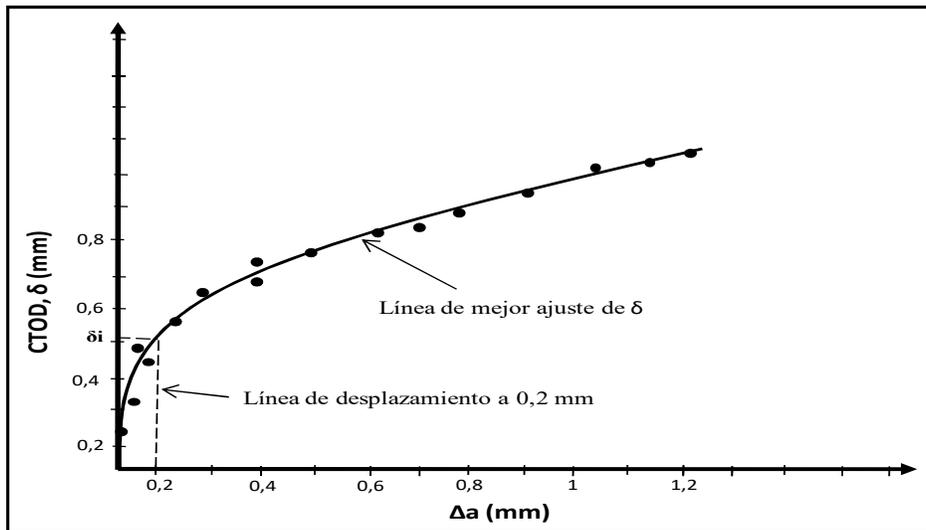


Figura 3: Curva característica de CTOD, δ para el PE.

El comportamiento a fractura mediante la MFEP (CTOD) se realizó aplicando el método de múltiples probetas a una temperatura de 23 ± 1 °C, obteniéndose la curva δ_{IC} vs Δa del material

sobre probetas a flexión en tres puntos tipo SENB. Para esto, a partir de las tuberías de PE-100 y PE-80 se extrajeron de las tuberías 25 probetas idénticas según la forma mostrada en la Figura 4.



Figura 4: Probeta Tipo SENB extraída de las tuberías de PEAD.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez establecidas las condiciones de prueba y realizados los ensayos preliminares para cada condición, material y orientación, se procedió a trabajar estadísticamente los resultados de los ensayos para las muestras de PE-100 y PE-80 con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm; esto con el fin de analizar la dispersión de los datos experimentales determinando el nivel de confianza de un 95% para los parámetros, a través de la recta de regresión. El procedimiento utilizado consistió específicamente en la construcción de los diagramas de dispersión de los resultados obtenidos y representando la recta de regresión con los respectivos límites de confianza (superior e

inferior) del 95 % para los parámetros (δ_{IC}) [13]. Las curvas δ - Δa mostradas en las figuras 5 y 6 representan los diagramas de dispersión y la recta de regresión ajustadas a través del método de los mínimos cuadrados correspondientes a las tuberías PE-100 y PE-80 en las orientaciones longitudinal y circunferencial. En la misma se puede observar que los datos se encuentran dentro de los límites de confianza de 95%, es decir, que presentan poca dispersión de los mismos y toma en cuenta la variabilidad presente en ellos; se reportan valores de $R^2 > 0,930$, lo que representa un ajuste adecuado de los modelos de regresión.

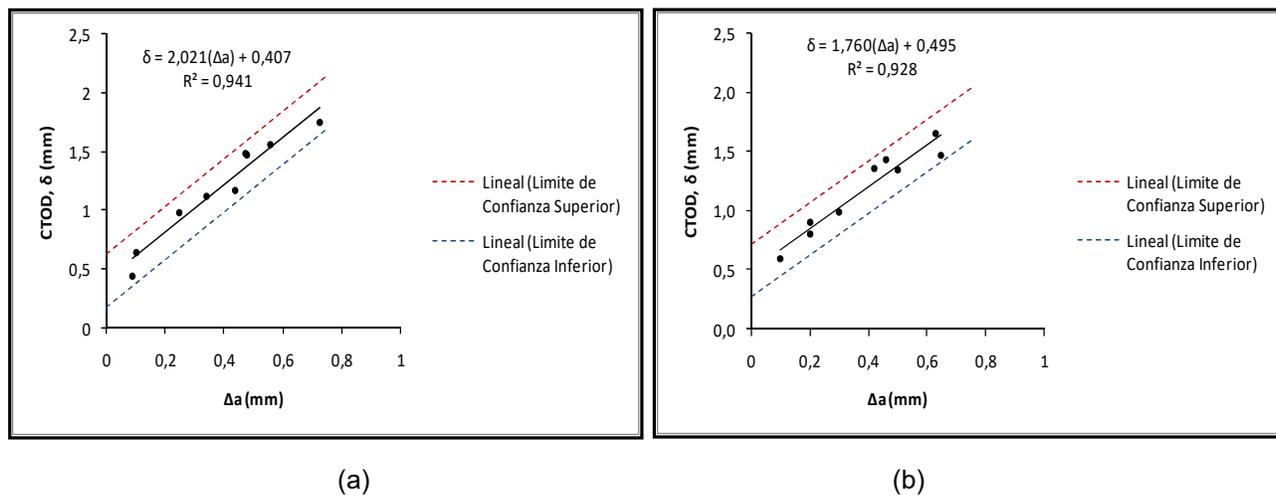
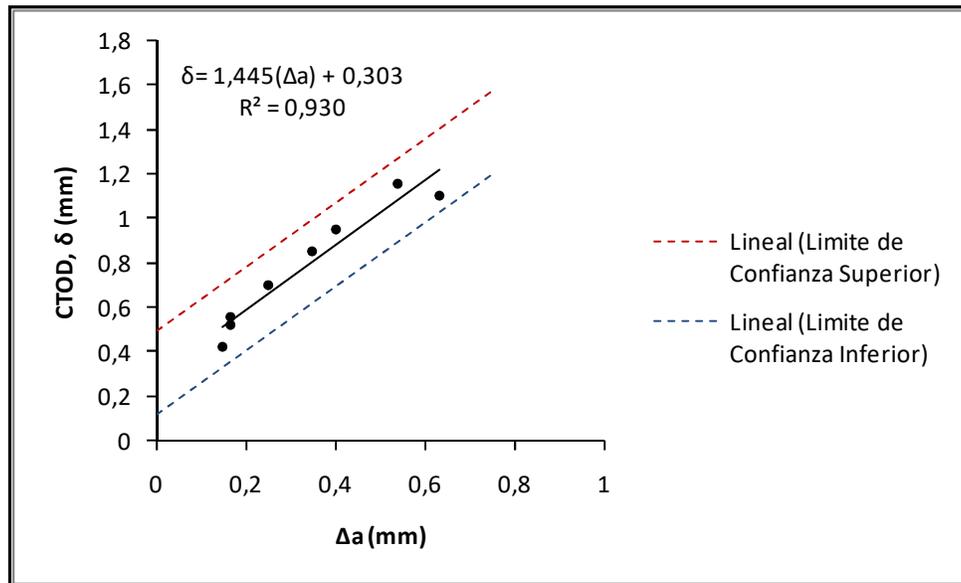
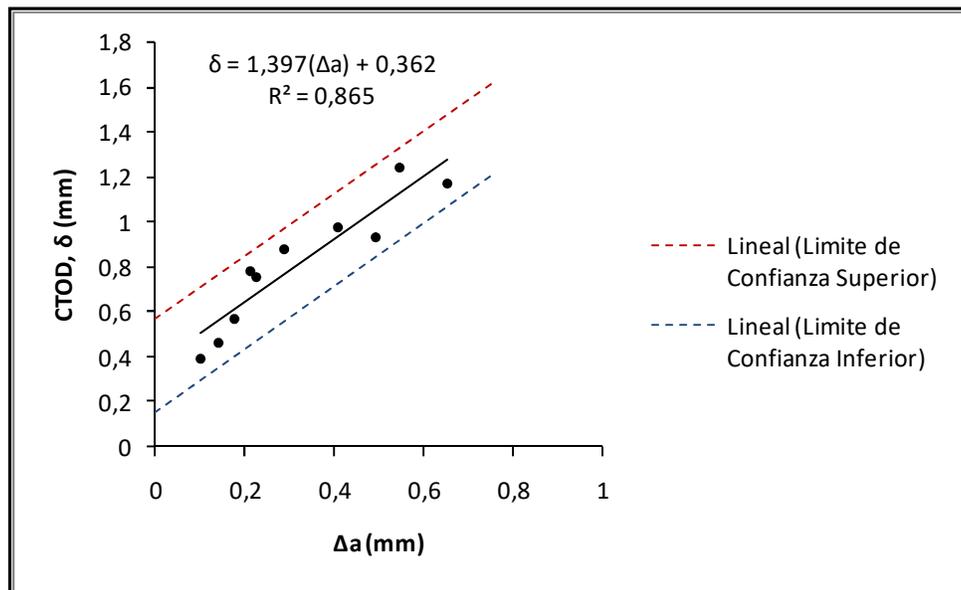


Figura 5: Curvas δ - Δa de dispersión y límites de confianza del 95% para el PE-100. a).- Orientación Longitudinal, b).- Orientación Circunferencial



(a)



(b)

Figura 6: Curvas δ - Δa de dispersión y límites de confianza del 95% para el PE-80. a).- Orientación Longitudinal, b).- Orientación Circunferencial

También se observa que las correlaciones de ajuste por mínimos cuadrados representan bien los datos experimentales, ya que se obtuvieron valores de R^2 superiores a 0,928 (rango de confiabilidad aceptable para el estudio de las variables a

analizar), con una excepción que se comentará a continuación. En la figura 6 (b) se observa una cierta dispersión de los datos respecto a la recta de ajuste ($R^2 = 0,865$); esta dispersión pudo haber sido generada al momento de realizar las

mediciones de los desplazamientos con el extensómetro o por situaciones típicas a la hora de la ejecución de los ensayos, como por ejemplo la alineación en la probeta al colocarla en el equipo de flexión, diferencias en la longitud de la pre-grieta por efecto de la memoria elástica del PEAD; cabe destacar que dicha pregrieta se realizó con una hojilla, y el tiempo entre una medición y otra podría ocasionar estas variaciones.

Para el estudio del comportamiento a fractura de las tuberías de PEAD (PE-100 y PE-80) aplicando el método de CTOD se elaboraron las curvas δ vs. Δa . La probeta utilizada fue la de flexión en tres punto tipo SENB mostrada en la Figura 1 con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm y $15,0 \pm 0,5$ mm. Los ensayos siguieron los lineamientos establecidos en las normas ASTM-E-1820 [16] y ASTM-E-1290 [17]. En la figura 7 (a) y (b) se presentan las curvas

δ vs. Δa para cada material en ambas orientaciones. En la figura se observa que los datos se ajustan bien a la curva potencial mostrando valores de $R^2 \geq 0,911$. Las figuras muestran un comportamiento similar en las curvas en la orientación de la grieta para cada material. El valor de δ_{IC} se determinó con un avance de crecimiento de grieta de 0,2 mm; este valor se determina al igual que para $J_{0,2}$ en el corte de la curva con la abscisa en 0,2 mm, valor representativo de δ_{IC} al inicio del enrromamiento que representa un crecimiento estable de la grieta. Este valor de δ_{IC} crítico representa la condición de la máxima carga (carga crítica) en el diagrama carga – desplazamiento donde se da inicio al crecimiento inestable de la grieta [18][20][5].

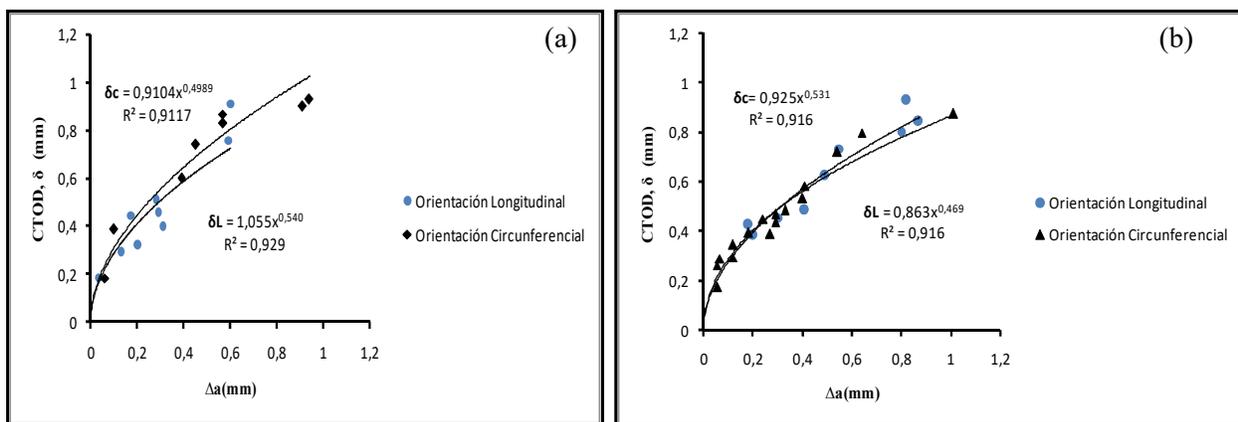


Figura 7: Curvas δ - Δa para PEAD con espesor de $8,5 \pm 0,5$ mm, velocidad de 5 mm/min (a).- PE-100 (b).- PE-80

En la Tabla II se muestran los valores correspondientes δ_{IC} para las tuberías de PE-100 y PE-80 con un espesor de pared $8,5 \pm 0,5$ mm. En la Tabla se observa que no existe diferencia significativa en las orientaciones y el material. Este

resultado permite concluir que antes del inicio de la propagación de la grieta (enrromamiento), los materiales presentan un comportamiento similar en cuanto al grado de ductilidad [20].

Tabla II: Parámetros de fractura δ_{IC} para las tuberías de PEAD con espesor $8,5 \pm 0,5$ mm.

Material	Parámetros de fractura (mm)	Orientación en la tubería	
		Longitudinal	Circunferencial
PE - 100		0,41	0,45

	δ_{IC}		
PE - 80		0,40	0,40

Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 (a) y (b) se presentan las curvas δ vs. Δa con espesor de $15,0 \pm 0,5$ mm para ambos materiales y orientaciones. En estas curvas se observa que no existen diferencias significativas entre orientaciones de acuerdo a la tendencia de los datos; este resultado coincide con los obtenidos en este proyecto con tuberías de espesores de 8,5

$\pm 0,5$ mm. Se evidencia mayor área bajo la curva para el PE-100 lo que se traduce en valores de δ_{IC} mayores a los reportados por el PE-80. En la Tabla III se muestran los parámetros de fractura donde se muestra una mayor resistencia al inicio de la grieta para el PE-100 en comparación con el PE-80 [20].

Tabla III: Parámetros de fractura δ_{IC} para las tuberías de PEAD con espesor $15 \pm 0,5$ mm.

Material	Parámetros de fractura (mm)	Orientación en la tubería	
		Longitudinal	Circunferencial
PE - 100		0,83	0,86
	δ_{IC}		
PE - 80		0,60	0,64

Fuente: Elaboración propia

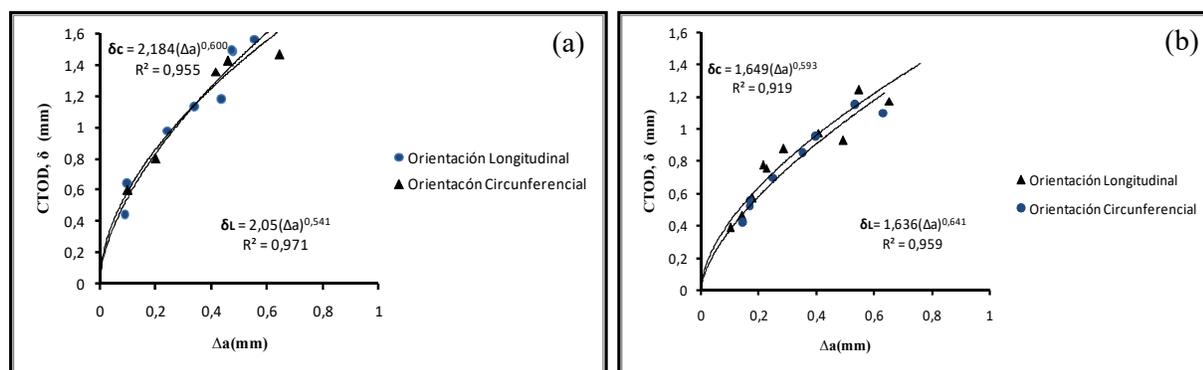


Figura 8: Curvas δ - Δa para PEAD con espesor de $15,0 \pm 0,5$ mm, velocidad de 5 mm/min (a).- PE-100 (b).- PE-80. Fuente: Elaboración propia

En las Tablas II y III se muestran los valores de CTOD para las tuberías de PE-100 y PE-80 con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm y $15,0 \pm 0,5$ mm en ambas orientaciones. En estos resultados se puede observar que las tuberías con espesor de $15,0 \pm 0,5$ mm presentan valores mayores a los reportados con tuberías de espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm; este comportamiento se puede atribuir a la mayor deformación plástica en la zona de enroscamiento que se presenta en un espesor de pared mayor [5], resultados que concuerdan con los obtenidos

aplicando la integral J [15]. La caracterización a fractura con el CTOD permite mayor rango de aplicación de estas tuberías, ya que se generaron especificaciones requeridas por las normas nacionales venezolanas (COVENIN) e internacionales (ASTM) para el control de calidad de estos materiales que presentan un alto grado de ductilidad. Este método del CTOD representa una técnica mejorada en la MFEP, basada en controlar los desplazamientos como principal enfoque en la etapa de diseño [19][20][21][22]; además

presentan menores restricciones de espesor para determinar la tenacidad de fractura K_{IC} en MFLE, ya que en la mayoría de los casos prácticos se dan las condiciones que representan un estado de esfuerzo plano cuando el material tiene un comportamiento elastoplástico, como es el caso del PEAD (Polímeros termoplásticos)[5].

La determinación de la curva δ_{IC} vs. Δa permitió caracterizar la resistencia la fractura de las tuberías

de PEAD en la etapa de enrromamiento, ya que el material de estas tuberías presentaron una alta tenacidad [9]; esto se debe principalmente por a las características propias del PEAD, donde obtener valores de crecimiento de grietas pequeños se complica, producto de la deformación plástica al frente de la grieta, tal cual como se demostró en la determinación de la recta de enrromamiento para las curvas J-R [15].

Tabla IV: Modelos experimentales δ - Δa a Fractura para muestras de tuberías de PE-100

Espesor (mm)	Orientación en la Tubería		
	Longitudinal	Ec. Curva δ vs. Δa R ²	Circunferencial
8,5 ± 0,5	$\delta_{IC} = 1,005(\Delta a)^{0,540}$ R ² = 0,929		$\delta_{IC} = 0,91(\Delta a)^{0,499}$ R ² = 0,912
15 ± 0,5	$\delta_{IC} = 2,05(\Delta a)^{0,541}$ R ² = 0,971		$\delta_{IC} = 2,184(\Delta a)^{0,600}$ R ² = 0,955

Fuente: Elaboración propia

Tabla V: Modelos experimentales δ - Δa a Fractura para muestras de tuberías de PE-80

Espesor (mm)	Orientación en la Tubería		
	Longitudinal	Ec. Curva δ vs. Δa R ²	Circunferencial
8,5 ± 0,5	$\delta_{IC} = 0,86(\Delta a)^{0,469}$ R ² = 0,916		$\delta_{IC} = 0,925(\Delta a)^{0,531}$ R ² = 0,916
15 ± 0,5	$\delta_{IC} = 0,64(\Delta a)^{0,641}$ R ² = 0,959		$\delta_{IC} = 1,649(\Delta a)^{0,593}$ R ² = 0,919

Fuente: Elaboración propia

En las Tablas IV y V se muestran los modelos de predicción experimental de las curvas δ - Δa . Estos modelos permiten caracterizar el valor del desplazamiento crítico en el inicio del crecimiento estable de la grieta en la región de enrromamiento. Estos resultados sirven de complemento para los códigos o protocolos de diseño, para generar un criterio más preciso y

actualizado en el diseño de tuberías fabricadas con PEAD.

En general, el estudio de la fractura en tuberías de PEAD a través del CTOD permitió determinar la deformación que se origina en el frente de la grieta antes de que inicie su propagación estable. Este resultado contribuye al estudio del análisis de fallas para materiales poliméricos.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de los diagramas de dispersión con límites de confianza de 95% obtenidos de los ensayos preliminares se logró predecir la reproducibilidad de los ensayos y desarrollar ecuaciones que describen el comportamiento de las propiedades mecánicas a fracturas para el PE-100 y PE-80 a través de las curvas CTOD, δ vs. Δa .

Ambos materiales mostraron diferencias en la tendencia de las curvas, presentando el PE-100 una pendiente más pronunciada previo a la propagación inestable de la grieta, como consecuencia del enrromamiento en la punta de la fisura, favoreciendo esto la aplicación del método CTOD en el estudio de mecánica de fractura para estos materiales. Por otro lado, el PE-80 exhibió una menor absorción de la energía de deformación antes de la fase de enrromamiento, lo cual concuerda con la tendencia decreciente de las curvas para las variables de estudio. Ello representa una mayor energía para la iniciación de la propagación de la fisura en la tubería PE-100. Estos resultados fueron confirmados con los ensayos del índice de fluidez (MFI), que reportaron medidas de 0,15 g/6min y 0,078 g/6min para el PE-80 y PE-100, respectivamente, que explicaría la mayor tenacidad a la fractura del PE-100 en comparación con el PE-80.

Se logró aplicar satisfactoriamente en polímeros el procedimiento de ensayo de tenacidad a la fractura descrito en la norma ASTM-1820 del CTOD para materiales metálicos, lográndose evaluar δ_{IC} para el inicio de crecimiento estable de grieta en 0,2 mm.

La determinación de la curva δ_{IC} vs. Δa a través del método de CTOD permitió caracterizar la resistencia a la fractura de las tuberías de PEAD en la etapa de enrromamiento de crecimiento estable de la grieta. El material de estas tuberías presentó una alta tenacidad, lo que se traduce en una alta deformación plástica en el frente de la grieta.

Los modelos experimentales obtenidos a través de las curvas de CTOD son un gran aporte al conocimiento técnico-conceptual en el área de

las propiedades mecánicas de los polímeros, ya que caracterizan el comportamiento real en la etapa de enrromamiento del avance de la grieta en los regímenes estables e inestables en condiciones de esfuerzo plano, lo que permite generar diseños más confiables y seguros de las tuberías de PE-100 y PE-80 para su aplicación al transporte y distribución de fluidos.

REFERENCIAS

- [1] Jaramillo, H., De Sánchez, N., Canizales, J. y Toro, A. *Introducción a la Mecánica de Fractura y Análisis de Falla*. Primera Edición. Universidad Autónoma de Occidente. Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia. 2008.
- [2] Machado G. Raúl R. *Análisis a Fatiga para Polietilenos de Alta Densidad utilizados en tuberías*. Tesis de Maestría. Decanato de estudios de Postgrado, Universidad Simón Bolívar, Caracas Venezuela. 2009.
- [3] Zakar F., Budinski, M. *Fracture of a saddle fusion (weld) joint in high density polyethylene (HDPE) pipe*. Engineering Failure Analysis. Volume 82; 481-492. 2017.
- [4] Olmos R. M., Peláez L. C. *Plan de empresa para La creación de RECOPLAST, empresa dedicada a La recuperación de productos plásticos reciclables*. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de occidente. Santiago de Cali. 2018.
- [5] Arana, J; González, J. *Mecánica de Fractura*. 3ra ed. Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua, Inprimatzea: Itxaropena, S.A. Universidad del País Vasco. 2002.
- [6] Revinca. *Literatura técnica de tuberías elaboradas de Polietilenos de Alta Densidad*. Revinca. Maracaibo. Estado Zulia. Venezuela. 2013.
- [7] Polinter. *Hoja Técnica para Polietilenos de Alta Densidad para Tuberías*. Caracas. Venezuela. 2017.
- [8] Freire J., Sánchez M. *Análisis comparativo de rehabilitación de red de aa.pp., utilizando tuberías PEAD, pvc, hierro dúctil, en suburbio oeste*. Universidad de Guayaquil facultad de ciencias

Matemáticas y físicas. Escuela de ingeniería civil. Trabajo de grado. 2018.

[9] Qi, F., Huo, L., Zhang, Y., y Jing, H. *Study on Fracture Properties of High-density Polyethylene (HDPE) Pipe*. College of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, China. Key Engineering Materials Vols. 261-263. pp 153-158. 2004

[10] Balankin, A. *Mecánica de la Fractura, pasado, presente y futuro*. Quinto congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. ESIME-IPN. México, D.F.2000

[11] Machado, R., González, M., González, J. *Estado del arte sobre la mecánica de fractura en tuberías de polietilenos de alta densidad (PEAD)*. Revista UIS Ingenierías. Universidad Industrial de Santander. Vol. 18, n.º4, pp. 81-94. Colombia. 2019.

[12] COVENIN 527. Tubos de Material Plástico. *Determinación de las características a la tracción*. Revisión, 1997.

[13] ESIS. *A Testing Protocol for Conducting J-Crack Growth Resistance Curve Test on Plastics*. Technical Committee Polymers and Composites. 2000

[14] American Society for Testing and Material (ASTM) D-5045. *Standard Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*.1999.

[15] Machado, Raúl; González, Marco; González, J; *Influencia de la Orientación Inducida por el Proceso de Elaboración de las Tuberías de PEAD PE-100 en su Comportamiento a la Fractura*. Universidad Católica Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. Revista TEKHNÉ. N° 23, Pp: 12- Pp. 23. Caracas. Febrero 2020.

[16] American Society for Testing and Material (ASTM) E-1820. *American Society for Testing and Material Standard Measurement of Fracture Toughness*, 2001.

[17] American Society for Testing and Material (ASTM) E-1290. *Standard Test Method for Crack Tip Opening Displacement -CTOD Fracture Toughness Measurement*. 1993.

[18] American Society for Testing and Material (ASTM) E-561-98. *Standard Practice for R-Curve Determination*, 1998.

[19] González, V., Jorge L. *Mecánica de Fractura*. Segunda Edición. EEUU. Editores Noriega. LIMUSA. México. 2007.

[20] Graice, I., Younan, M. y Radwan, S. *Experimental Investigation Into the Fracture Toughness of Polyethylene Pipe Material*. Journal Pressure Vessel Technology. February. Vol. 127. 2005.

[21] El-Zoghby, A. y Al-Bastaki, N. *Application of Elastic-Plastic Fracture Mechanics criteria to specimens cut from Plastic Pipes*. Mechanical Design and Production Department. Seventh Cairo University International MDP Conference cairo February 15 – 17. Giza. Egypt.2000.

[22] Rojas, G. M., Rink, M. y Müller, A. *Aplicación del Trabajo Esencial de Fractura a Copolímeros de Etileno y Olefina de diversos Porcentajes de Cristalinidad y Comportamiento Mecánico*. Dept. de Química, Materiales e Ing. Química “Giulio Natta”, Politécnico de Milano, Milano. Grupo de Polímeros USB, Dept. de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Rev. Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. vol. 22 no.2. 2002.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
COVENIN	Comisión Venezolana de Normas Industriales

ESIS	European Structural Integrity Society
J	Integral J
MFEP	Mecánica de Fractura elastoplástica

MFLE	Mecánica de Fractura lineal elástica	P	Fuerza máxima
Δa	Crecimiento de grieta	B	Espesor
CTOD, δ	Desplazamiento de la apertura del frente de la grieta	ν	Coefficiente de Poisson
δ_{ic}	Desplazamiento de la apertura del frente de grieta crítico en 0,2 mm	W	ancho de la probeta
ν_p	Componente plástico de desplazamiento	σ_y	Esfuerzo de fluencia
E	Módulo de elasticidad axial (módulo de Young)	HDPE	Polietileno de Alta Densidad (en sus siglas en ingles)
K	Factor de intensidad de esfuerzos	PE	Polietileno
		PEAD	Polietileno de Alta Densidad
		PE – 100	PE con resistencia de resina de 10 MPa
		PE – 80	PE con resistencia de resina de 8 MPa