

Influencia de la Orientación Inducida por el Proceso de Elaboración de las Tuberías de PEAD PE-100 en su Comportamiento a la Fractura

Raúl Machado¹, Marco González², Jeanette González³

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

Grupo de Investigación de Diseño Mecánico, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Departamento de Mecánica y Tecnología de la Producción. Punto Fijo, Venezuela¹
Universidad Simón Bolívar. Departamento de Mecánica. Caracas, Venezuela ^{2,3}

Resumen: Este artículo se centra en un estudio experimental de mecánica de fractura que determinó la influencia de la orientación generada por el proceso de fabricación de las tuberías de PE-100. Los ensayos se realizaron en muestras de tuberías de Polietileno de Alta Densidad PEAD (PE-100) 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 mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP), estableciendo las consideraciones y criterios requeridos según las normas ASTM D-5045, E-1820, E-399, E-813, E-1152 y el Protocolo *ESIS* (*European Structural Integrity Society*) para polímeros. Los estudios de mecánica a fractura se realizaron en probetas tipo SENB (flexión en tres puntos) para las variables involucradas. Los resultados experimentales permitieron elaborar curvas J-R (J vs. Δa) para caracterizar el comportamiento de la grieta en las tuberías de PE-100 en la dirección de los esfuerzos principales, longitudinal y circunferencial, a la velocidad de 5 mm/min, y para valores de espesor de $8,5 \pm 0,5$; $15 \pm 0,5$ y $22 \pm 0,5$ mm. Los resultados revelaron que la orientación de la grieta en la tubería influye ligeramente en la resistencia a la fractura para el PEAD estudiado, lográndose determinar que en la dirección circunferencial las tuberías de PEAD presentaban una resistencia mayor que en la dirección longitudinal, independientemente del espesor de la tubería.

Palabras Claves: Mecánica de fractura, PEAD, Tuberías, Análisis experimental, Orientación de grieta, Curvas JR.

Abstract: This article is focused on an experimental study of fracture mechanics to determine the influence of the orientation generated by the PE-100 pipe manufacturing process. The tests were carried out on samples of HDPE High Density Polyethylene (PE-100) pipes obtained directly from pipes without any additional processing, in order to achieve a real service characterization of pipes. The study is based on trials of elastoplastic fracture mechanics (MFEP), establishing the considerations and criteria required according to ASTM D-5045, E-1820, E-399, E-813, E-1152 and the ESIS Protocol (European Structural Integrity Society) for polymers. The studies of fracture mechanics were carried out in SENB type test tubes (three-point flexion). The experimental results allowed to elaborate JR curves (J vs. Δa) to characterize the crack behavior of PE-100 pipes in the direction of the principal stresses, longitudinal and circumferential, at the speed of 5 mm/min, and for wall thicknesses of 8.5 ± 0.5 ; 15 ± 0.5 and 22 ± 0.5 mm. The results show specimens orientation slightly influences the resistance to fracture for HDPE, determining that for the circumferential direction the HDPE pipes had a greater resistance than for the longitudinal direction, regardless of the pipe wall thickness.

Key Words: Fracture mechanics, HDPE pipe, Experimental analysis, Crack orientation, JR curves.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio de los materiales, el comportamiento de los polímeros cobra cada día más relevancia, en parte debido a la creciente utilización de este tipo de materiales en aplicaciones ingenieriles. Uno de los polímeros más utilizados a nivel industrial es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), por ofrecer diversas de

aguas residuales en el sector municipal e industrial, transporte de gas e hidrocarburos en complejos petroquímicos y sistemas de riego en aplicaciones agrícolas entre otros [1][2][3][4].

Las condiciones de operación a las que está sometido un sistema de tuberías generan cargas de impactos y fatiga producto de las fluctuaciones de la presión interna o la externa.

Aunado a esto, las discontinuidades propias en el diseño, ocasionan el deterioro del material, agrietamientos o desmejoras de sus propiedades mecánicas. El origen de estos problemas en los materiales se debe a defectos intrínsecos generados durante el proceso de manufactura. Estas imperfecciones hace inevitable la presencia de microgrietas o fisuras que actúan como concentradores de esfuerzos, y disminuyen la resistencia del material y su capacidad para soportar las condiciones de operación. Esta situación pudiera originar una falla catastrófica no deseable para el sistema donde se encuentre en funcionamiento determinada tubería de PEAD. En la actualidad, el diseño de sistemas de tubería o de cualquier componente mecánico elaborado con PEAD se basa en la suposición de que es un material homogéneo, sin considerar fisuras, rasgaduras o grietas, o sea que el material no posee defectos. Ello implica un diseño que desconoce el comportamiento mecánico a fractura de las tuberías de PEAD en presencia de una grieta. Una grieta o un defecto en el material ocasiona que los desplazamientos y deformaciones sean mayores en la parte afectada del sistema y genera una reducción de la capacidad para soportar cargas, evitando así que pueda cumplir con la función para la cual fue diseñado, además de reducir su vida útil

mejoras en relación a su flexibilidad, bajo costo y excelente resistencia a la corrosión en comparación con otros materiales más convencionales como el acero; empleándose principalmente para la producción de múltiples gamas de tuberías que han sido útiles para soluciones eficaces en sistemas de redes de distribución de agua potable y vertederos

afectando la integridad mecánica de los sistemas involucrados [5].

Recientemente, las 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], 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 sus procesos de fractura. La meta principal de cualquier análisis de la mecánica de fractura (MF) es prevenir la falla [7], de tal manera que garantice la integridad mecánica de los equipos, disminuyendo así daños y pérdidas económicas.

Hasta la fecha no se han desarrollado estudios de mecánica de fractura en tuberías de PEAD fabricadas en Venezuela. Es importante y necesario 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

A. Materiales

El trabajo desarrollado está enfocado en un estudio experimental que pretende establecer la resistencia a la fractura en tuberías elaboradas con Polietilenos de Alta Densidad (PEAD): PE-

100. Las especificaciones técnicas de las tuberías utilizadas en la investigación se muestran en la tabla 1. Las tuberías de PE-100 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.

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 [8], el Protocolo ESIS [9] y la norma ASTM D-5045 [10] para polímeros. En la Figura 1 se muestran las dimensiones de las probetas tipo SENB para estos ensayos y en la Figura 2 se puede observar la disposición de estas probetas en ambas orientaciones (longitudinal y circunferencial) de las tuberías de PEAD.

B. Ensayos de Mecánica de Fractura

Tabla 1: 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 ± 0,5	13,6 / 7,4	185 / 360
PE - 100	250	22 ± 0,5	11	235

Fuente: Polinter, 2017 [11]; Revinca, C.A, 2019 [4]

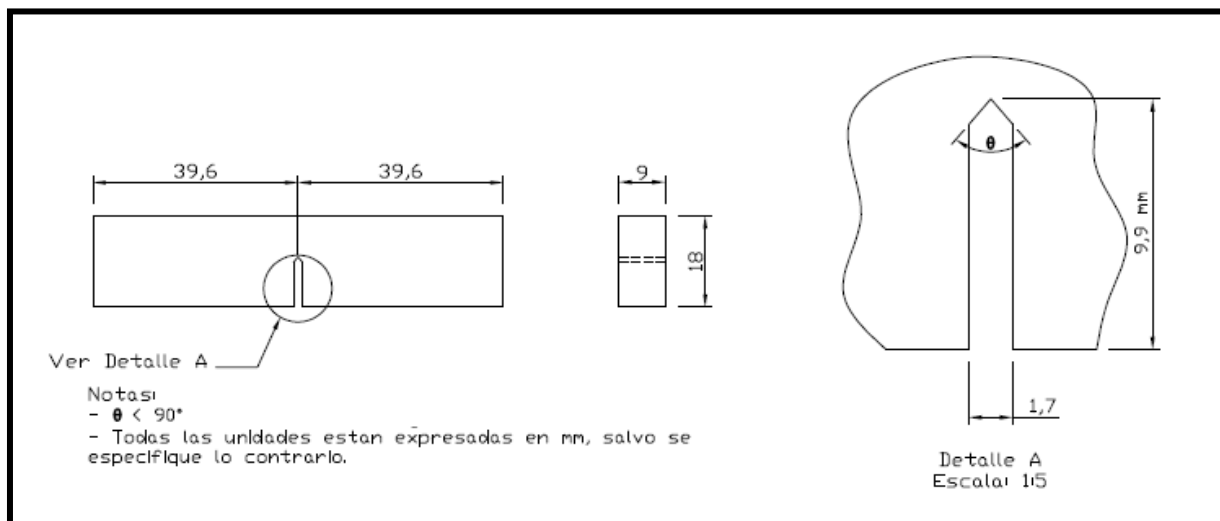


Figura 1: Geometría en mm de la probeta tipo SENB [9]

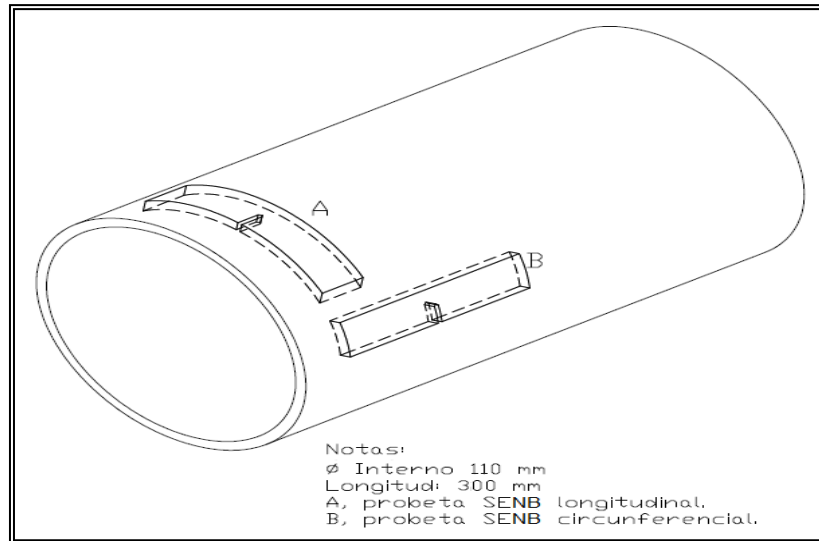


Figura 2: Disposición de las probetas SENB en las tuberías. **Fuente:** Elaboración propia

C. Mecánica de Fractura Elastoplástica

Para construir la curva J-R (J vs Δa) del PE-100 se parte de una serie de probetas idénticas, cada

una de las cuales se carga hasta diferentes desplazamientos (curva carga vs. desplazamiento) como se muestra en la Figura 3, y se mide la longitud de propagación de grieta correspondiente a cada ensayo.

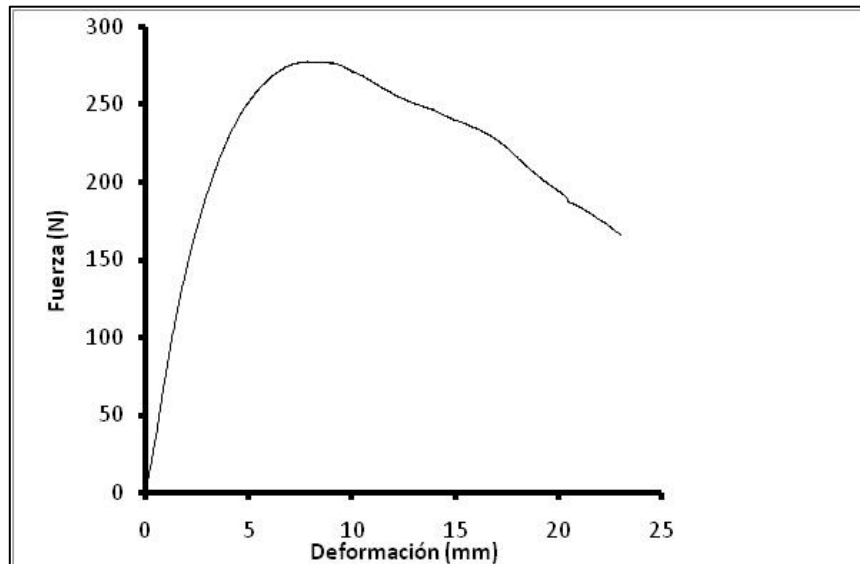


Figura 3: Curva carga vs. Desplazamiento PE-100. **Fuente:** Propia

La curva de resistencia se obtiene representando gráficamente la energía necesaria para generar nuevas superficies de fractura (J), que representa el área bajo la curva carga vs. desplazamiento (Figura 3) para cada probeta, frente al incremento de la grieta (Δa), ajustándose los puntos a una curva de tipo potencial:

$$J = A(\Delta a)^N \quad (1)$$

Para medir la propagación de la grieta (Δa), después de cada ensayo se coloca una gota de tinta china en la punta de la entalla, que por capilaridad penetra en el material hasta la propagación de la grieta; una vez realizado esto, se deja secar la tinta y se separan las dos mitades de la probeta, revelando el frente de avance y con él la extensión de la propagación. El valor de Δa se midió con una macrolupa modelo SZ61 del laboratorio de microscopía electrónica de barrido de la Universidad Simón Bolívar.

El comportamiento a fractura mediante la MFEP (integral J) se realiza aplicando el método de múltiples probetas a una temperatura de 23 ± 1 °C, obteniéndose la curva J vs Δa del material sobre probetas a flexión en tres puntos tipo SENB. Para esto, a partir de las tuberías de PE-100 y de acuerdo a las variables estudiadas en este proyecto se extrajeron 25 probetas idénticas como la mostrada en la Figura 4.



Figura 4: Probeta Tipo SENB.

El tipo de probeta y modo de desplazamiento para el análisis a fractura en estas tuberías fue seleccionado debido a que la presión del fluido dentro de la tubería produce un esfuerzo tangencial o circunferencial (σ_c) que ocasiona un aumento en el diámetro de la tubería, y un esfuerzo longitudinal (σ_L) que produce un aumento en la longitud de la misma. Adicional a estos, se generan también esfuerzos en la dirección radial de la tubería, los cuales son despreciables debido a que los espesores de las muestras de tuberías fueron de $8,5 \pm 0,5$ mm; $15 \pm 0,5$ mm y $22 \pm 0,5$ mm, y cumplen con las condiciones de tuberías de pared delgada [12][13][14].

Además de los esfuerzos por presión interna, también se pueden generar esfuerzos debidos al peso de la tubería y a su contenido; estas cargas representan esfuerzos longitudinales que pudieran generar en cada tramo de la tubería momentos flectores y en consecuencia esfuerzos por flexión [15][16][17]. Estos estados de esfuerzo representan las cargas que generan un crecimiento de la grieta en cada orientación considerada.

Para obtener la curva J vs Δa , se siguen las recomendaciones de las normas ASTM D-5045 [10], E-1820 [18], E-399 [19], E-813 [20], E-1152 [21] y del Protocolo ES/S [9] donde se especifica el procedimiento para el ensayo de este tipo de materiales, de modo que con cada probeta se obtuviera un punto de la curva J vs. Δa . Concluido el ensayo de cada probeta se separan las partes de fractura. Con el objeto de realizar una medida del crecimiento de la grieta lo más precisa posible, se procedió a medir la extensión de la propagación sobre la superficie de fractura utilizando una macrolupa modelo SZ61. La medición del avance de grieta se realiza tomando

en cuenta el promedio en 5 puntos del frente de avance de la grieta a partir de la pregrieta realizada a la entalla; este procedimiento se lleva a cabo para cada probeta en particular.

La Figura 5 muestra la superficie de fractura para el PE-100, en la figura se distingue claramente la entalla mecanizada (sección a), la zona hecha manualmente para agudizar la entalla (sección b) y la propagación de la grieta representada por la tinta china (sección c).

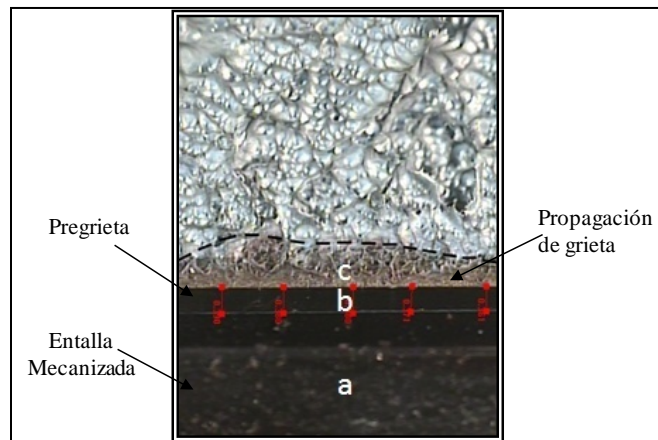


Figura 5: Superficie de fractura para el PE-100

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estudiar el comportamiento a fractura de las tuberías de PEAD se necesita la elaboración de las curvas J vs. Δa . Las probetas extraídas de las tuberías PE-100 fueron sometidas a cargas de flexión en tres puntos a las condiciones de ensayo establecidas.

En la Figura 6 se muestran las curvas J vs Δa características del PE-100 para ambas orientaciones, obtenida a través del ajuste de los resultados experimentales con tendencia del tipo potencial mediante la ecuación (1) y a la velocidad de ensayo de 5 mm/min. El ajuste potencial de las curvas se realizó con el programa Excel® y, posteriormente, una regresión de los datos que muestra los valores de A y N con sus respectivas desviaciones.

En estas curvas se determinan los valores de la integral J correspondientes a un crecimiento de grieta de 0,2 mm ($J_{0,2}$), como lo establece el Protocolo *ESIS*; este valor se determina en el corte de la curva con la abscisa en 0,2 mm, valor representativo de J al inicio del crecimiento estable, es decir, $J_{0,2} = J_{IC}$.

Es importante resaltar que las propiedades mecánicas de estas tuberías dependen de las propiedades del polímero, su comportamiento viscoelástico, de su historial térmico y del proceso de extrusión en la fabricación; además, a las tuberías se les incorpora un 5% de negro humo, cuyas partículas pueden variar notablemente las

propiedades mecánicas a fractura [22][23][24][25].

Estos resultados mostrados en la Tabla II presentan cierta similitud con los estudios realizados por Bernal *et al.* (2002) [26] en tuberías

de polietilenos de media densidad, donde J_{IC} alcanza valores de 15,45 KJ/m². Similares resultados se reportan en el protocolo ES/S para diferentes laboratorios donde los valores de J_{IC} para Polietilenos puros están alrededor de 13,11 KJ/m².

En la Tabla II se observa que existe una pequeña diferencia, 6 % aproximadamente, en la resistencia a la fractura entre ambas orientaciones. Por ejemplo, en la orientación longitudinal, las tuberías elaboradas de PE-100 reportan un valor de $J_{IC} = 15,61$ KJ/m²,

ligeramente inferior a la orientación transversal ($J_{IC} = 16,61$ KJ/m²).

Este comportamiento es razonable ya que en la dirección longitudinal la grieta avanza por medio de la separación de las cadenas poliméricas (grieta paralela a las cadenas) como principal mecanismo de fractura [27][28]. En la dirección circunferencial el mecanismo de falla sería el rompimiento de las cadenas, por lo tanto, la energía necesaria para generar nuevas superficies de fractura es mayor [25]. Este aspecto se logra evidenciar en la curva carga vs. desplazamiento para la orientación circunferencial.

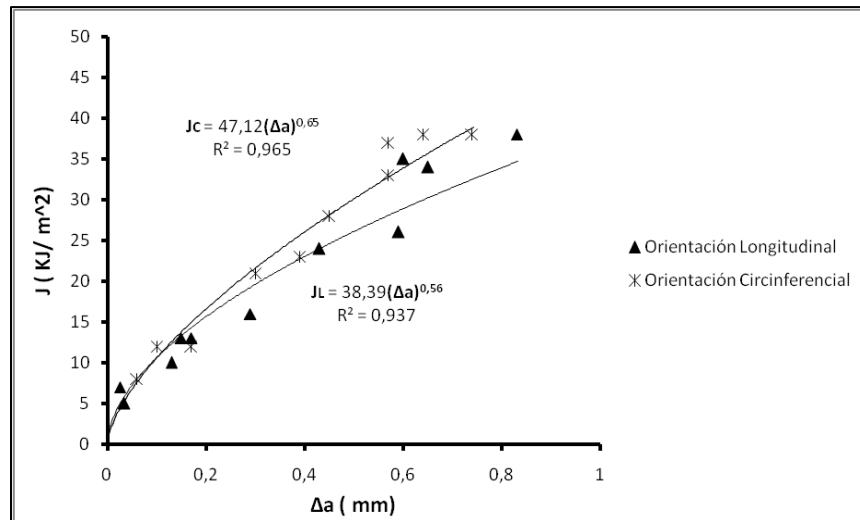


Figura 6: Curvas Experimentales J vs Δa para el PE-100 en ambas orientaciones con espesor de $8,5 \pm 0,5$ mm, velocidad de 5 mm/min. Fuente: Elaboración propia

La Figura 6 muestra que ambas orientaciones presentan un comportamiento similar representado en la iniciación de la curva J vs Δa , dando lugar al comienzo del enrromamiento en la punta de la grieta (pérdida de agudización), hasta alcanzar un cierto valor cercano a $J_{0,2}$, en el cual se visualizan pequeñas diferencias; a partir de este punto se comienza a extender de modo estable la grieta.

Esta tendencia en los resultados a fractura es posible, debido al grado anisotrópico originado por la orientación de las cadenas poliméricas del polietileno producto del proceso de extrusión durante la elaboración de las tuberías.

Este comportamiento favorece la utilización de este material para aplicaciones de tuberías, ya que la presión interna en tuberías de pared delgada (relación radio de tubería / espesor de tubería mayor o igual a 10) genera esfuerzos circunferenciales que duplican a los esfuerzos longitudinales.

Tabla II: Parámetros de Fractura para el PE-100

Parámetros de Fractura	Orientación en la Tubería	
	Longitudinal	Circunferencial
$J_{IC} (KJ/m^2)$	15,61 ± 0,3	16,61 ± 0,7
A	38,39 ± 1,09	47,88 ± 1,06
N	0,559 ± 0,05	0,681 ± 0,04

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el análisis más exhaustivo de la influencia de la orientación en el proceso de elaboración en las tuberías de PE-100, se toman como referencia probetas de las tuberías PE-100 en ambas orientaciones a los espesores de $15 \pm 0,5$ mm y $22 \pm 0,5$ mm y velocidad de desplazamiento de mordazas de 5 mm/min, para así complementar los resultados obtenidos con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm.

Primeramente se realizaron ensayos de PE-100 en ambas orientaciones a la velocidad de 5 mm/min con el espesor de $15 \pm 0,5$ mm; esto con la finalidad de visualizar el comportamiento a fractura y la tendencia de acuerdo a los resultados obtenidos en los apartados anteriores con espesor de $8,5 \pm 0,5$ mm.

En la Figura 7 se muestran las curvas J vs Δa en estas condiciones. En la figura se observa que los

datos se ajustan bien a la curva potencial mostrando valores de $R^2 \geq 0,9003$.

La Figura 7 muestra que aumentando el espesor de pared, la tendencia de cada una de las curvas es semejante a las probetas extraídas de las tuberías y ensayadas con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm para ambos materiales; esto verifica la reproducibilidad de los ensayos.

En la Figura 8 se presentan las curvas J vs. Δa de la resistencia a la fractura para PE-100 en dirección longitudinal y circunferencial con espesor de $22 \pm 0,5$ mm. En esta figura se puede observar que la resistencia a la fractura para PE-100 con diferente espesor presenta una mayor resistencia en la orientación circunferencial.

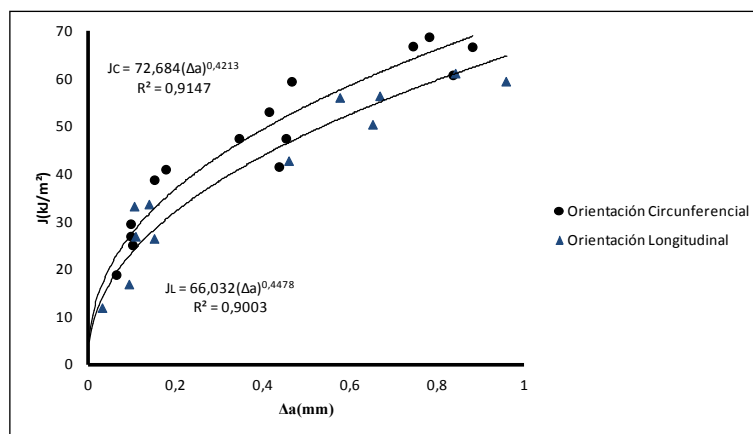


Figura 7: Curva J vs Δa para PE-100 con espesor de $15 \pm 0,5$ mm, velocidad de 5 mm/min.

Fuente: Elaboración propia

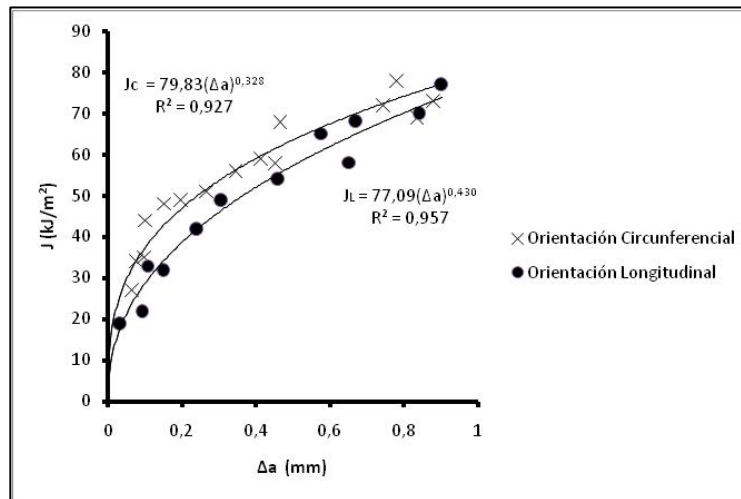


Figura 8: Curvas J vs Δa para PE-100 con espesor $22 \pm 0,5$ mm. Velocidad 5 mm/min.
Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 7 y 8 se observa que la diferencia entre las orientaciones se evidencia desde el inicio de las curvas, lo que permite inferir que a medida que aumenta la carga desde el inicio del avance de la grieta, este material es adecuado para aplicaciones de tuberías, siempre y cuando se mantengan las condiciones de pared delgada.

En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de J_{IC} para las tuberías de PE-100 en ambas orientaciones y espesores de $15 \pm 0,5$ mm y $22 \pm 0,5$ mm. En estos resultados se puede observar que en la orientación circunferencial se requiere mayor energía para la propagación de la grieta, lo cual coincide con los resultados obtenidos con espesores de $8,5 \pm 0,5$ mm.

Tabla III: Parámetros de Fractura para el PE-100 con espesor de $15 \pm 0,5$ mm

Parámetros de fractura	Orientación en la Tubería	
	Longitudinal	Circunferencial
J_{IC} (kJ/m^2)	32,12	36,90
A	$66,03 \pm 1,09$	$72,68 \pm 1,06$
N	$0,45 \pm 0,042$	$0,42 \pm 0,036$

Fuente: Propia

Tabla 4: Parámetros de Fractura para el PE-100 con espesor de $22 \pm 0,5$ mm

Parámetros de fractura	Orientación en la Tubería	
	Longitudinal	Circunferencial
J_{IC} (kJ/m^2)	38,59	47,09
A	$77,09 \pm 1,02$	$79,83 \pm 1,04$
N	$0,43 \pm 0,042$	$0,328 \pm 0,031$

Fuente: Propia

En la tabla 5 se muestran los valores de J_{IC} para las tuberías de PE-100 con espesores de $8 \pm 0,5$ mm; $15 \pm 0,5$ mm y $22 \pm 0,5$ mm en ambas orientaciones. En estos resultados se puede observar que las tuberías con espesores de $22 \pm 0,5$ mm presentan mayores valores en su resistencia a la fractura a los reportados con tuberías de espesores de $8,5 \pm 0,5$ y $15 \pm 0,5$ mm, manteniendo el grado de anisotropía discutido previamente, referido a la orientación generada por el proceso de manufactura de las tuberías.

Los resultados reportados en la tabla 5 representan valores de resistencia a la fractura en estado de esfuerzo plano para las tuberías de PE-100 en las orientaciones circunferencial y longitudinal, esto debido a la condición de las especificaciones de las tuberías estudiadas (pared delgada), por tanto se pueden considerar como propiedades mecánicas a fractura válidas para las especificaciones de las tuberías establecidas en la tabla 1.

Tabla 5: Parámetros de Fractura para el PE-100 con diferentes espesores

Espesor (mm)	Orientación en la Tubería		
	Longitudinal	J_{IC} (kJ/m ²)	Circunferencial
$8,5 \pm 0,5$	15,61		16,61
$15 \pm 0,5$	32,12		36,90
$22 \pm 0,5$	38,59		47,09

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolla un estudio experimental acerca de la resistencia a la fractura de tuberías fabricadas con polietileno de alta densidad e identificadas como PE-100. La variable de ensayo principal es la orientación de elaboración de las probetas, longitudinales y circunferenciales; y en segundo lugar el espesor de pared de las tuberías para verificar la incidencia de la orientación para los espesores de tuberías de $8,5 \pm 0,5$ mm, $15 \pm 0,5$ mm y $22 \pm 0,5$ mm.

En general, la resistencia a la fractura en la orientación circunferencial es ligeramente mayor al valor determinado para la orientación longitudinal. Se destaca la tendencia de las curvas J vs. Δa en el inicio de la propagación de la grieta, allí la resistencia a la fractura es muy similar para ambas orientaciones, y a medida que se incrementa la propagación, la diferencia en la tendencia inestable aumenta.

Este comportamiento favorece la utilización de estos materiales para aplicaciones de tuberías, ya que la presión interna en tuberías de pared delgada genera esfuerzos circunferenciales que duplican a los esfuerzos longitudinales y se

necesitaría mayor energía para generar el avance de la grieta en esta dirección. La diferencia en la resistencia a la fractura con la orientación era de esperarse debido a la orientación de las cadenas poliméricas generada por el proceso de extrusión en la fabricación de las tuberías.

Este trabajo representa un aporte importante a la mecánica de fractura en materiales poliméricos, ya que se obtuvieron parámetros de fractura para PE-100 a través de las curvas J vs Δa . Estos parámetros deberían tomarse en cuenta en el diseño y fabricación de sistema elaborados con PEAD.

REFERENCIAS

- [1] 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
- [2] Informe de gestión. Hidrofalcón. *II trimestre 2012*. Estado Falcón, Venezuela. 2016
- [3] Barboza D. y Rimapa D. “*Proyecto de pre-factibilidad de instalación de una planta de producción Polietileno a partir del Etileno*”. Proyecto de Grado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque. Perú. 2017
- [4] Revinca. *Literatura técnica de tuberías elaboradas de Polietilenos de Alta Densidad*.2019
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] COVENIN 527. Tubos de Material Plástico. *Determinación de las características a la tracción*. Revisión, 1997.
- [9] ESIS. *A Testing Protocol for Conducting J-Crack Growth Resistance Curve Test on Plastics*. Technical Committee Polymers and Composites. 2000
- [10] American Society for Testing and Material (ASTM) D-5045. *Standard Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*.1999
- [11] Polinter. “*Hoja Técnica para Polietilenos de Alta Densidad para Tuberías*”.2017
- [12] American Society of Mechanical Engineers B31.3 (ASME B31.3). *Process piping*. Tercera edición.2000
- [13] American Society of Mechanical Engineers B31.3 (ASME B31.3). *Process piping*. Tercera edición. 2004
- [14] Megyesy, E. *Manual de Recipientes a Presión. Cálculo y diseño. Parte I. Normas de Tuberías*. Editorial Limusa, S.A. Noriega Editores. México D.F. 2004
- [15] Kannappan, Sam. *Introduction to pipe stress analysis*. John Wiley and Sons. EE.UU.1986
- [16] Goncalves, Raúl. *Introducción al Análisis de Esfuerzos*, Segunda Edición. Editado por R. Goncalves. Caracas. Venezuela. 2002
- [17] Goncalves, Raúl. *Introducción al Análisis de Esfuerzos*, Tercera Edición. Editado por R. Goncalves. Caracas. Venezuela. 2008
- [18] American Society for Testing and Material (ASTM) E-1820. *American Society for Testing and Material Standard Measurement of Fracture Toughness*.2001
- [19] American Society for Testing and Material (ASTM) E-399. *American Society for Testing and Material Standard Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*.1990
- [20] American Society for Testing and Material (ASTM) E-813. *American Society for Testing and Material Standard JIC a Measure of Fracture Toughness*.1997
- [21] American Society for Testing and Material (ASTM) E-1152. *American Society for Testing and Material Standard. Standard Test Method for J-R Curves*.1997
- [22] 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
- [23] Machado, R., González, M., González, J. *Comportamiento Mecánico de Polietilenos de Alta Densidad (PEAD) Utilizados en Tuberías*. Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Jornadas de Investigación y Segundo encuentro Académico-Industrial de Enseñanza de la Ingeniería (JIFI). Caracas Venezuela. 2008
- [24] Machado, R., González, M., González, J. *Comportamiento a fatiga de tuberías de PEAD*. 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 17-20 Noviembre, Las Palmas de Gran Canarias 2009. Islas Canarias, España. 2009
- [25] González, M., Machado, R., González, J. *Fatigue analysis of HDPE pipes under axial loading*. Proceedins of ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2011 July 17 – 21, 2011. Baltimore. Maryland, USA. 2011
- [26] Bernal C., Lopez, H. y Frontini, P. *Failure prediction analysis for polyethylene flawed pipes*. Institute of Materials Science and Technology (INTEMA), University of Mar del Plata and National Research Council (CONICET), J.B. Justo 4302, B7608FDQ Mar del Plata, Argentina. 2002
- [27] Jiménez, A., Omar, A. *Comportamiento a la fractura de composites de matriz de poliestireno*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ciencias de los materiales e ingeniería metalúrgica. Barcelona, España. 2002
- [28] González, V., Jorge L. *Mecánica de Fractura*. Segunda Edición. Editores Noriega. LIMUSA. México. 2007

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- ASME: American Society for Testing and Material
- COVENIN: Comisión Venezolana de Normas Industriales
- HDPE: Polietileno de Alta Densidad (siglas en ingles)
- PE: Polietileno
- PEAD: Polietileno de Alta Densidad
- PE-100: PE con resistencia de resina de 10 MPa
- $J_{0,2}$: Resistencia a la fractura de 0,2 mm del total de crecimiento de grieta incluyendo el Enromamiento en la punta de la grieta.
- J_{1c} =Resistencia al inicio de propagación de la grieta
- σ_L : Esfuerzo Longitudinal
- σ_C : Esfuerzo Circunferencial