



Estado del arte sobre la mecánica de fractura en tuberías de polietilenos de alta densidad (PEAD)

State of the art on fracture mechanics in high density polyethylene pipes (HDPE)

Raúl Machado¹, Marco González^{2a}, Jeanette González^{2b}

¹Grupo de Investigación de Diseño Mecánico, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Departamento de Mecánica y Tecnología de la Producción, Venezuela.
Correo electrónico: Rmachado.unefm@gmail.com.

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Caracas, Venezuela. Orcid: ^a 0000-0002-1205-8723.
^b 0000-0002-6201-6265. Correos electrónicos: ^a margdleon@usb.ve, ^b jjgonza@usb.ve

Recibido: 23 octubre, 2018. Aceptado: 17 marzo, 2019. Versión final: 5 agosto, 2019.

Resumen

Este artículo presenta una investigación descriptiva–documental que pretende dar una visión sobre la situación actual de los estudios experimentales de mecánica de fractura desarrollados en tuberías fabricadas en PEAD (PE-100 y PE-80). En primer lugar, se presentan los resultados y principales conclusiones de las teorías de fractura utilizadas en cada investigación abordada. Luego, se ilustran en forma resumida las técnicas utilizadas en las últimas décadas para la caracterización a fractura elastoplástica de materiales con alto grado de ductilidad y que muestran un fuerte comportamiento viscoelástico, como en el caso del PEAD. Por otro lado, se especifican los requerimientos para realizar los ensayos experimentales, así como las propiedades del material (J_{IC} , δ_{IC} , W_F) obtenidas y su aplicación en el campo de la ingeniería como criterio de fractura. El producto de esta investigación ha permitido evidenciar que en los últimos años, los estudios experimentales realizados de mecánica de fractura elastoplástica para las tuberías fabricadas en PEAD son pocos y genéricos, sin presentar una caracterización completa que permita interpretar el comportamiento mecánico de estas tuberías bajo la presencia de grietas o defectos, de tal manera de aportar propiedades mecánicas ($K_I - CTOD$) que contribuyan a mejorar los procesos de diseño de las tuberías.

Palabras clave: Mecánica de fractura; Tuberías; PEAD.

Abstract

The aim of this work is to present a descriptive - documentary research to give an insight into the current situation of experimental studies of fracture mechanics developed in pipes made of HDPE (PE-100 and PE-80). In first place, there are presented the results and main conclusions of the fracture theories used in each investigation. In addition, the techniques used in the last decades for the characterization to elastoplastic fracture of materials with a high degree of ductility, and showing a strong viscoelastic behavior as in the case of HDPE, are summarized. On the other hand, the requirements to perform the experimental tests are specified, as well as the properties of the material (J_{IC} , δ_{IC} , W_F) obtained and its application in the field of engineering as a fracture criterion. The product of this research allows to demonstrate that in recent years the experimental studies carried out on elastoplastic fracture mechanics for pipes made of HDPE are few and generic, without presenting a complete characterization to interpret the mechanical behavior of these pipes under the presence of cracks or defects in such a way as to provide mechanical properties ($K_I - CTOD$) that contribute to improving the design processes of the pipes.

Keywords: Fracture mechanics; Pipes; HDPE.



1. Introducción

Los requerimientos fundamentales de cualquier estructura o elemento de máquina en el campo de la ingeniería mecánica es que éste no falle durante el servicio. El problema de resistencia y fractura de materiales es conocido como uno de los más importantes en el progreso de la Ciencia y la Tecnología.

La Mecánica de Fractura se encarga de relacionar las condiciones de carga aplicadas en un cuerpo fisurado y la resistencia que éste presenta al crecimiento de esta fisura y posterior fractura. La falla ocurrirá si la resistencia del material a la fractura, con la presencia de una fisura aguda, es menor que las condiciones esfuerzo-deformación impuestas por las condiciones de carga y geometría.

La Mecánica de Fractura se ha impulsado desde los materiales metálicos, tradicionales de ingeniería, que siendo magníficos para la construcción de componentes de máquinas y como elementos estructurales, han dado a lo largo de su historia importantes roturas frágiles, que han obligado al estudio y modelización de su comportamiento bajo diferentes tipos de sollicitaciones [1].

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 comenzando a aplicar en materiales poliméricos cuyo comportamiento a fractura tiene características propias para incluir aspectos tan característicos de los plásticos como la viscoelasticidad y la viscoplasticidad que influyen en los procesos de manufactura de sistemas de tuberías [2]; [3]. En la industria de manufactura y del reciclaje, el polímero más utilizado por ofrecer diversas mejoras en relación a su flexibilidad, bajo costo y excelente resistencia a la corrosión 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 [1];[5];[6];[7].

El PEAD es un termoplástico fácil de obtener, procesar y con muy buenas propiedades físicas, químicas, mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas [6], que lo hacen uno de los plásticos más consumidos en el mundo. En el mundo, el polietileno de alta densidad es la resina, dentro de los polietilenos, que tiene la mayor demanda para la fabricación de tuberías, debido a sus excelentes propiedades en la resistencia a la fractura[8] [9]. En el año 2007, el consumo mundial de PEAD fue alrededor de 31,6 millones de toneladas, y la demanda de este tipo de polietileno en Perú para el año 2015 representaba

163,240 toneladas/año, con un crecimiento anual de 10,036 toneladas/año y una proyección para el año 2025 de 250000 Toneladas/año [9]. Domínguez [10] estima que el consumo del PEAD para el año 2020 representará más del 72 % de la producción total de tuberías plásticas, con un incremento anual de producción del 9%.

En la tabla 1 se puede ilustrar el comportamiento del consumo de tuberías de PEAD para las últimas décadas para Europa occidental con respecto a otros materiales plásticos y su proyección para el año 2020.

Tabla 1. Estimación del consumo de tubería de PEAD para el año 2020[10].

	1990 (%)	2000 (%)	2010 (%)	2020 (%)
PVC	71	58	48	22
PEAD	19	29	38	72
PEBD/PELBD	5	5	4	2
PP	3	5	7	3
Otros	2	3	3	1

En Venezuela, específicamente en el estado Falcón, la utilización de tuberías elaboradas con este material ha tomado un amplio campo dentro de la industria. La empresa Hidrofalcón ha logrado optimizar el funcionamiento de las instalaciones operativas y los sistemas de agua potable y aguas servidas en distintas zonas de la geografía falconiana con el uso de este material. Para el año 2013, Hidrofalcón instaló 38 kilómetros de tubería de PEAD (PE-100 y PE-80) de diámetros 6", 8", 10" y 12", beneficiando a las comunidades de la región.

En dicho estado además se lleva a cabo la fase final del Acueducto Bolivariano, donde hasta la fecha se han instalado tuberías de PEAD de 54" de diámetro bajo el lecho marino, lo que permitirá el suministro de agua a toda la Península de Paraguaná, beneficiando a más de 800 mil habitantes [11].

Todo esto indica la gran utilización de este tipo de tuberías en el mundo; de allí la gran importancia de seguir realizando estudios que permitan una caracterización mecánica completa a fractura de estas tuberías de PEAD, específicamente PE-100 y PE-80, las cuales, como se referenció, son utilizadas en la distribución de agua para las comunidades y el sector industrial a nivel mundial.

2. Metodología

Para la realización de este artículo, fue necesaria una búsqueda de fuentes de información documentales (impresas y electrónicas).

La revisión consistió en una búsqueda avanzada con palabras clave como “*Fracture Toughness Behavior of Polyethylene Pipe Materials, Fracture Mechanics, HDPE y High Density Polyethylene Piping*”. Esto permitió ubicar páginas web, publicaciones en línea periódicas y no periódicas, tesis, libros, boletines técnicos y revistas científicas, como por ejemplo *ScienceDirect*. Inicialmente esta búsqueda arrojó 978 resultados entre artículos, tesis, boletines técnicos y libros, de los cuales se seleccionaron los enmarcados en los años 2000-2018. Es importante señalar que solo se analizaron los documentos que presentaban la información completa, ya que existe información donde no se logró el acceso. Otra parte de la información fue consultada en textos relacionados con el área de mecánica de fractura, además de boletines técnicos de empresas fabricantes de tuberías de PEAD.

Luego de recolectada la información se realizó la clasificación para su análisis, de acuerdo a las teorías de mecánica de fractura y así seleccionar las que presentaban relevancia con el objeto de estudio.

3. Resultados de la investigación

3.1. Orígenes y Antecedentes Básicos

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 (*f.s.*), 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, construcción o generados durante el servicio y, por lo tanto, surge la necesidad de analizar su efecto en el comportamiento de dichos sistemas [12].

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. Además, permite 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. En la ecuación (1) se ilustra esta teoría.

$$U = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (1)$$

U = Energía Potencial

σ = Esfuerzo

a = Tamaño de la grieta

E = Módulo de Young

Irwin, en 1957, introdujo un avance importante en la mecánica de fractura, planteando el análisis en términos de esfuerzos, lo cual no se había podido hacer anteriormente debido a que teóricamente en la punta de una grieta los esfuerzos tienden a infinito, independientemente de la magnitud de la carga aplicada. Irwin plantea que el proceso de fractura no puede concentrarse en un sólo punto, como se deduciría de un análisis netamente elástico, sino que se presenta en una zona pequeña pero finita, que se denomina zona plástica. En esta zona los esfuerzos dejan de ser infinitos porque parte de la energía elástica se consume en la deformación plástica del material próximo a la punta de la grieta [13]; estos esfuerzos alrededor de la grieta en condiciones de estado de esfuerzo plano son determinados con las ecuaciones (2).

$$\sigma_{xx} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

Y en condiciones de estado de deformación plana, se obtiene la ecuación (3).

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (3)$$

Es así como este aporte ha proporcionado bases para estudios de mecánica de fractura en diferentes materiales que presentan un comportamiento elastoplástico en sus

procesos de fractura, como es el caso de algunos polímeros.

Entre las primeras investigaciones relacionadas con el comportamiento mecánico de materiales poliméricos se encuentran estudios sobre mecanismos de falla por fractura a través de la velocidad de crecimiento de la grieta y fractura en materiales compuestos, donde se manifiestan las principales variables involucradas en la respuesta a fractura de estos materiales [14];[15];[16];[17];[18].

3.2. Estudios de Mecánica de Fractura en Polímeros

A continuación, se describen brevemente los estudios de origen experimental relacionados con la mecánica de fractura en polímeros en las últimas décadas:

En el año 2000, Niglia *et al.*[19] presentan un trabajo basado en la determinación de los parámetros derivados de la mecánica de fractura para el caso de distintos grados de polietilenos utilizados en tuberías para transporte de fluidos en la industria del gas y petróleo. Los ensayos se realizaron sobre probetas tipo *arc-shaped*, tanto en el rango estático (velocidad de ensayo igual a 2 mm/min) como dinámico (velocidad de ensayo igual a 1 m/s). El polietileno de baja densidad exhibió fractura dúctil con propagación estable de fisura, determinándose la *Curva R* y el parámetro de iniciación de fractura J_{IC} (Integral J) del material. En los ensayos de impacto se analizó un grado de polietileno modificado con fibras de vidrio cortas, que presentó un comportamiento frágil. La caracterización a fractura de este material, se realizó a partir de la determinación de la tasa de liberación de energía G_{IC} .

Sánchez [20], en su tesis doctoral, estudia el efecto que tiene la introducción de una carga rígida de microesferas de vidrio sobre las propiedades mecánicas y sobre la fractura del poliestireno. Para los ensayos de mecánica de fractura se utilizaron probetas de flexión por tres puntos tipo SENB. Entre los resultados más resaltantes se observan diferentes comportamientos de acuerdo al porcentaje de mezcla; con valores inferiores al 6% se presenta una fractura inestable siendo aplicable la Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL). Otro factor importante es que con bajas velocidades de deformación se generan pequeños números de micro fisuras de cuarteo (crazes) estables; la grieta se propaga por el interior de las crazes y el valor de la resistencia a la fractura tiende a ser bajo.

Ferrer [21] presentó su trabajo de tesis doctoral titulado “Aplicación del Método del Trabajo esencial de fractura al estudio de películas de Polipropileno y de Copolímeros

Propileno–Etileno en bloque (EPBC)”. Esta investigación fue un estudio experimental donde se determinaron las propiedades a fractura del PP y del EPBC por medio de la técnica del trabajo esencial de fractura. Los resultados revelaron que esta técnica se adapta bien para la caracterización a fractura de películas de polímeros y permitió estudiar la relación entre su estructura y las propiedades de fractura que presentan.

Rojas, *et al.*[22] estudiaron la mecánica de fractura de diversos polietilenos (PE) aplicando el Método del Trabajo Esencial de Fractura (MTEF) sobre probetas de geometría *DENT* (*Double Edge Notched Tensión*) sometidas a modo de fractura I. Este método fue utilizado por su grado de adecuación en la caracterización de la fractura de materiales dúctiles (elastoplásticos) en estado plano de esfuerzo. Se utilizaron tres tipos de PE: un Polietileno de Alta Densidad (PEAD), un Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD) y un Polietileno de Muy Baja Densidad (PEMBD). El MTEF resultó aplicable tanto para el PEAD como para el PELBD, sin embargo, el PEMBD no pudo ser caracterizado por su comportamiento elastomérico y debido a la falta de similitud en sus curvas carga-desplazamiento [23]. Entre los resultados se encontró que el grado de cristalinidad es una variable que posee una gran influencia sobre el valor del trabajo esencial de fractura, que resultó ser menor para el PEAD que para el PELBD.

Posteriormente, en el año 2005, Graice *et al.* [24] estudiaron el comportamiento mecánico a fractura de polietilenos de alta densidad (PE-80 y PE-100), utilizados en tuberías para el transporte de gas. Esta investigación fue un estudio experimental donde se realizó una comparación entre ambos materiales de acuerdo a su comportamiento a fractura. Entre los resultados obtenidos se tiene que ambos materiales presentan un comportamiento elastoplástico y que el PE-80 evidencia una mayor resistencia a la fractura que el PE-100. Las probetas obtenidas para este estudio fueron elaboradas por medio del proceso de inyección.

Matos *et al.* [25] realizaron la caracterización mecánica de polipropilenos venezolanos grado inyección. Entre los ensayos para la caracterización mecánica está el comportamiento a fractura, el cual se llevó a cabo por medio de los postulados de Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL). Las probetas utilizadas para los ensayos fueron el tipo SENB de acuerdo a las indicaciones del protocolo de la *European Structural Integrity Society (ESIS)*. Entre los resultados se muestra que el polipropileno homopolímero (PPh) exhibe un comportamiento puramente frágil. Por su parte, el polipropileno copolímero (PPc) presenta cierta ductilidad, evidenciado esto por la disminución de

linealidad en la curva carga vs desplazamiento. Es importante destacar que para ambos materiales, tras el impacto inicial, las mitades de la probeta fueron expulsadas en sentido contrario a la dirección del impacto, hecho que se relaciona con una propagación inestable de grieta.

Kwon y Jar [26] presentan una investigación de tipo experimental basada en la metodología del trabajo esencial de fractura, tomando en cuenta el criterio de estado de esfuerzo plano para determinar la tenacidad a la fractura en tuberías de polietilenos de alta densidad. Las probetas utilizadas fueron tipo DENT. Se determinaron las curvas carga vs desplazamiento, así como las curvas de energía de trabajo vs longitud de la entalla en condiciones de esfuerzo plano. Las muestras se ensayaron a una velocidad de 5 mm/min y fueron extraídas en dos direcciones por la anisotropía generada por el proceso de extrusión en la fabricación de las tuberías. Los resultados más resaltantes en este estudio demuestran que la orientación en la dirección de la carga en la tubería influye en la respuesta a fractura del material. Estos mismos investigadores en el año 2007 [27] realizaron un estudio experimental donde el objetivo principal fue identificar los mecanismos de deformación y el consumo total de energía mediante el principio del trabajo esencial de fractura en polietilenos de alta densidad. Este trabajo se realizó mediante ensayos de tracción uniaxial utilizando probetas tipo DENT. Entre los resultados más importantes se señala que la tenacidad a la fractura y el consumo de energía total pueden variar continuamente de acuerdo a la longitud y velocidad de crecimiento de grieta para los ensayos con probetas tipo DENT.

De igual manera, Schouwenaars *et al.* [28] realizaron un estudio de crecimiento de grietas para tuberías de polietileno de alta densidad de 24 pulgadas (610 mm); el estudio estuvo basado en un análisis experimental utilizando la norma ASTM D-5045 para polímeros y se usó la probeta tipo CT (Compacta de Tensión); los resultados demostraron que la causa de falla en estas tuberías fue la combinación de dos situaciones: primero un crecimiento lento de la grieta y segundo una gran cantidad de defectos e inclusiones producto del proceso de extrusión para la fabricación de las tuberías.

Martínez *et al.* [29] estudiaron el comportamiento a fractura de materiales para lentes oftálmicas, el CR-39 y el superfin; las investigaciones realizadas estuvieron basadas en la mecánica de fractura lineal elástica debido a las características frágiles de estos materiales termoestables. Las probetas utilizadas fueron las de tipo SENB. Los materiales presentaron distintos tipos de

propagación de grietas, presentando el superfin una mayor tenacidad a la fractura que el CR-39.

Salazar *et al.* [30] establecen la influencia de los parámetros estructurales en el comportamiento a fractura de copolímeros en bloque etileno-propileno. Los ensayos mecánicos y de fractura se realizaron variando la temperatura en cuatro magnitudes: 23, 0, -40 y -80 °C con una velocidad de ensayo de 1 mm/min. Entre los resultados se puede destacar que la energía necesaria para iniciar el crecimiento estable de grieta y la resistencia a la propagación estable de grieta aumentan con el peso molecular del material.

Hanxiao *et al.* [31] realizaron estudios del comportamiento a fractura y crecimiento de grietas en muestras de polietilenos de mediana densidad (PEMD). Los espesores de las muestras fueron de 0,3 mm y estuvieron sometidas a cloro por 45 días con una concentración de 8 ppm para su degradación a 80°C de tal manera de analizar el efecto de estas condiciones en sus propiedades. Los resultados obtenidos mostraron que el PEMD puede ser utilizado en aplicaciones para el diseño de componentes en paneles solares. El método de fractura utilizado fue la Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL) a través del Trabajo Esencial de Fractura (EWF) con probetas tipo DENT preparadas por moldeo de compresión. Las longitudes del ligamento oscilaban en $5,1 \pm 0,6$ mm. En los resultados se observó que W_t presentaba grandes % de error y se estima que fue debido a la variación en la longitud del ligamento observado en el diagrama carga-desplazamiento; otro efecto observado es que el error decrece con el incremento de la degradación.

En 2014, Djebli *et al.* [32] realizaron un análisis experimental a fatiga axial en muestras de tuberías de PEAD, específicamente PE-100. Las probetas fueron extraídas directamente de la tubería en dirección longitudinal y circunferencial donde los parámetros o variables de ensayo fueron a una frecuencia de carga de 2 Hz y una relación de esfuerzo de $R=0.0$. Entre los resultados obtenidos se estableció la curva S-N bajo esas condiciones. Los niveles de esfuerzos aplicados estuvieron por el 50% del S_y ocasionando ruptura de las probetas bajo ciclos cortos de carga lo que no es recomendable para el diseño ya que estas tuberías estarán sometidas a presión interna en condiciones normales de operación. Ese mismo año, Peres *et al.* [33] realizaron un estudio experimental de mecánica de fractura para el PEMD (conocido como PE-80) el cual es utilizado para el diseño de tuberías por extrusión, que son empleadas en sistemas de distribución de agua y gas. La metodología utilizada fue el EWF bajo la teoría de la MFLE. La geometría de la probeta, fabricada mediante moldeo por

compresión, fue tipo DENT donde el espesor varía de 1 a 3 mm. Las longitudes de los ligamentos para las probetas fueron de 6, 8, 10, 12, 14 y 16 mm y se empleó una velocidad de ensayo de 5 mm/min. Los resultados mostraron que la variación del espesor tiene efecto en los parámetros de fractura obtenidos a través del *EWLF*.

Posteriormente, El-Bagory^a *et al.* [34] realizaron una investigación donde estudiaron el efecto del esfuerzo en la tenacidad a la fractura en probetas tipo compacta de tensión (CT) elaboradas en PEAD. Estas probetas fueron sometidas a tracción axial con espesores de 30 mm y velocidad de ensayo entre 10 y 500 mm/min. Las probetas fueron fabricadas con uniones de soldadura por fusión. En los ensayos de mecánica de fractura se evidenció que el amplio rango de la velocidad de ensayo tiene un efecto significativo en la tenacidad a la fractura elastoplástica (J_{IC}).

Zhu *et al.* [35] realizaron ensayos de inspección no destructivos de ultrasonido a una frecuencia de 10 MHz en tuberías de PEAD y de PVC. Los espesores de las tuberías para ambos materiales fueron de 6 mm. Se insertaron grietas externas de 1 y 2 mm para ambas muestras de material en la dirección longitudinal. El objetivo fue evaluar la integridad estructural en estas tuberías utilizando el método de ultrasonido donde se observaron buenos diagnósticos para la inspección de tuberías elaboradas con polímeros.

Luego Salazar *et al.* [36] analizaron la tenacidad a la fractura en muestras de PEAD utilizando las teorías de MFLE y MFEP. En las probetas analizadas se utilizó una pre-grieta realizada para ensayos a fatiga. Los ensayos de mecánica de fractura lineal elástica fueron independientes de la mecánica de fractura elastoplástica. Los resultados con la MFEP presentaron valores menores a los arrojados con MFLE.

El-Bagory *et al.* [37] estudiaron el comportamiento mecánico de tuberías de PEAD en diferentes condiciones de carga y configuración de las probetas. Las probetas fueron extraídas en dirección longitudinal y transversal. La norma utilizada fue la ASTM D 2290-12 para ensayos de tracción; el espesor de las muestras fue de 10 mm y la velocidad de ensayo varió desde 10 hasta 1000 mm/min. Los resultados revelan que la velocidad de ensayo afecta significativamente en el comportamiento mecánico de las muestras, evidenciado en el diagrama esfuerzo vs. deformación. Ese mismo año, El-Bagory *et al.* [38] comparan la MFEL (G_{IC}) y la MFEP (J_{IC}) en tuberías de

PEAD utilizadas para transportar gas natural. El rango de velocidades de ensayo fue de 5 a 500 mm/min y espesores de las probetas de 9 a 45 mm. Los resultados mostraron que existen diferencias en el comportamiento a la fractura para ambas teorías debido a la excesiva deformación plástica en la punta de la grieta.

Zhang y Ben Jar [39] comparan las propiedades mecánicas para el PE-100 y PE-80. Las propiedades mecánicas analizadas fueron el esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo de relajación, módulo de elasticidad (E), esfuerzos viscoelásticos y cuasi-estáticos. El ensayo utilizado fue el de tracción axial. La comparación se realizó variando la velocidad de ensayo para las probetas. En los resultados se evidenció que las propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad, esfuerzos viscoelásticos y cuasi-estáticos para el PE-100 son mayores en comparación con el PE-80, pero el PE-80 presentó un mayor esfuerzo de relajación antes de fracturarse.

Más recientemente, Márquez G. [40] estudiaron el comportamiento mecánico de envases reciclados de PEAD y de sus mezclas con virutas de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM). Este trabajo se basó en la variación del contenido de PEUAPM en 0, 10, 20, 30 y 40% en peso para la caracterización a fractura utilizando la técnica del trabajo esencial de fractura. Los resultados mostraron que para las mezclas estudiadas el ω_e y el ω_p disminuyen al aumentar la cantidad de PEUAPM, es decir, que se obtiene una menor resistencia a la fractura para estas mezclas. Los valores de los parámetros ω_e y ω_p para el PEAD reciclado disminuyeron un 27,0% y 44,5%, respectivamente, en comparación a los resultados obtenidos por González A. [41], para el PEAD 6200B puro (materia prima virgen).

En 2017, Kalantar *et al.* [42] presentaron un estudio entre las resinas PE-80 y PE-100 y señalan que la tubería PE-100 está elaborada con una resina que posee características que permiten un crecimiento de grieta mucho más lento que con el PE-80, producto de una distribución de pesos moleculares bimodal, lo que permite su amplia aplicación para recipientes a presión.

En la tabla 2 se presenta un resumen de las investigaciones experimentales realizadas en PEAD y mecánica de fractura en polímeros, donde se especifican los materiales y la teoría o técnica de fractura utilizada.

Tabla 2. Investigaciones experimentales en PEAD mecánica de fractura, 2018

Autor (es)	Año de publicación	Material	Teoría/técnica de fractura utilizada
Niglia <i>et al.</i>	2000	PEAD	MFEP
Sánchez Miguel	2000	Poliestirenos y microesferas de vidrio	MFLE
Ferrer Didac	2001	PP, Propileno-Etileno	EWf
Rojas, <i>et al.</i>	2002	PEAD, PEBD, PEMBD	EWf
Graice <i>et al.</i>	2005	PE-80 y PE-100	MFEP
Matos <i>et al.</i>	2005	PPh y PPc	MFLE
Kwon y Jar	2006	PEAD	EWf
Kwon y Jar	2007	PEAD	EWf
Schouwenaars <i>et al.</i>	2007	PEAD	MFEP
Martínez <i>et al.</i>	2008	CR-39, Superfin	MFLE
Salazar <i>et al.</i>	2009	Etileno-Propileno	MFLE
Hanxiao <i>et al.</i>	2012	PEMD	MFLE, EWf
Djebli <i>et al.</i>	2014	PEAD, PE-100	-
Peres <i>et al.</i>	2014	PEMD, PE-80	MFLE, EWf
El-Bagory ^a <i>et al.</i>	2014	PEAD	MFEP
Zhu <i>et al.</i>	2015	PEAD	-
Salazar ^a <i>et al.</i>	2015	PEAD	MFLE, MFEP
El-Bagory <i>et al.</i>	2015	PEAD	EWf
El-Bagory <i>et al.</i>	2015	PEAD	-
González <i>et al.</i>	2015	PEAD/PEUAPM	EWf
Zhang y Ben Jar	2016	PE-80 y PE-100	EWf
Márquez <i>et al.</i>	2017	PEAD/PEUAPM	EWf
Kalantar <i>et al.</i>	2017	PE-80 y PE-100	-

3.3. Análisis de los resultados

En las investigaciones que se han encontrado en los últimos años relacionadas con estudios experimentales de mecánica de fractura en polímeros, se ha observado la utilización de diferentes técnicas de caracterización a fractura basadas en las teorías de la mecánica de fractura lineal elástica y en la mecánica de fractura elastoplástica.

Como se puede apreciar, en la actualidad no existen estudios de mecánica de fractura en tuberías de PEAD realizados en Venezuela. Por otro lado, en las investigaciones que se han encontrado relacionadas con estudios experimentales de mecánica de fractura lineal elástica y elastoplástica no se consideraron variables determinantes de la caracterización a fractura de cualquier material establecidas en normas y protocolos como lo son la influencia de la variación de: la velocidad de ensayo para determinar la resistencia a la fractura, longitud entalla y espesor, además de la orientación inducida por el proceso de elaboración de las tuberías de PEAD (dirección longitudinal y circunferencial de las

tuberías), a excepción del trabajo realizado por Kwon y Jar en el año 2006 en Canadá, donde las muestras se ensayaron a una sola velocidad de ensayo (5 mm/min) y fueron extraídas en ambas direcciones.

En los estudios de mecánica de fractura en polímeros se observa que la variedad de las probetas utilizadas para los ensayos de fractura no permiten una caracterización completa en condiciones reales de operación de la tuberías ya que las mismas fueron elaboradas por inyección, extrusión o moldeadas por compresión del material puro (sin ningún tipo de pigmento) en equipos de laboratorio [5, 6] y las características mecánicas a fractura de las tuberías dependen del proceso de extrusión utilizado para la fabricación de las tuberías, proceso que genera un cierto grado de anisotropía debido a la orientación de las cadenas poliméricas del polietileno [2, 28].

De la sección anterior se deduce que la utilización de estos materiales para aplicaciones de tuberías es punto de interés para el diseño, 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 [43, 44], valores que se deben tomar en cuenta para un diseño adecuado con este material. Interesa conocer si la presencia de una grieta en tuberías fabricadas con PEAD se propaga rápidamente debido a la presión interna que se genera en condiciones de operación.

Por otro lado, se ha comprobado que el PEAD utilizado en tuberías es un material termoplástico que se caracteriza por tener un alto grado de ductilidad[2] y mostrar un fuerte comportamiento viscoelástico. Por lo tanto, resulta más adecuado utilizar criterios de la Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP) para determinar la tenacidad a fractura de los materiales para estas tuberías.

En la tabla 3 se muestra en forma resumida las técnicas utilizadas para la caracterización a fractura para materiales que presentan un comportamiento lineal elástico y elastoplástico de materiales con alto grado de ductilidad (Diagrama carga vs desplazamiento).

En la tabla 3 se especifican los requerimientos para realizar los ensayos experimentales, así como la

propiedad del material obtenida y su aplicación en el campo de la ingeniería como criterio de fractura. La aplicación de la propiedad obtenida para el campo de la ingeniería como cumplir para cada técnica y así establecer si el resultado obtenido (J_{IC}, δ_{IC}, W_F) se puede considerar como una propiedad intrínseca del material que se debe tomar en cuenta en el diseño o por lo contrario, valores característicos del material bajo las condiciones específicas de operación de las muestras de tuberías ensayadas.

Es evidente que en todas las técnicas de caracterización a fractura es necesario determinar el diagrama carga vs desplazamiento y a partir de este obtener la energía generada durante el proceso de avance de la grieta que da lugar a las superficies de fractura (energías elástica y plástica). Un producto de gran relevancia de esta investigación es que ha permitido evidenciar que en los últimos años los estudios experimentales realizados de mecánica de fractura elastoplástica (como la técnica de la integral J) para las tuberías fabricadas con PEAD son pocos, considerando el gran rango de aplicación que se tiene y que se proyecta [10]. Otro factor importante que se observa es que no se han desarrollado estudios con la aplicación del método de desplazamiento de la apertura del frente de grieta (*CTOD*) en materiales poliméricos, a excepción de los trabajos publicados por Pettarin *et al.* [45], Frank *et al.* [46], y Muñoz [47].

Tabla 3. Técnicas de caracterización a fractura en tuberías de PEAD, 2018

Teoría	Técnica (propiedad a fractura)	Aplicación ingenieril	Criterio de confiabilidad
Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE)	Factor de Intensidad de Esfuerzos - K_C (K_{IC})	Parámetro de fractura de materiales dúctiles y frágiles	Estado plano de deformación ($K_{IC} > \frac{2,5K_C}{\sigma_Y}$)
	Trabajo Esencial de Fractura EW_F (W_F)	Parámetros a fractura de materiales dúctiles	Estado plano de esfuerzo ($\sigma_{MAX} = 1,15\sigma_Y$)
Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP)	Integral J (J_{IC})	Caracterizar el comportamiento elastoplástico de cuerpos agrietados	Estado plano de deformación ($B > \frac{25J_{IC}}{\sigma_Y}$)
	Desplazamiento de abertura de grieta - $CTOD$ (δ_{IC})	Especificación requerida para el control de calidad de materiales. Especificación mínima de ductilidad en la punta de la grieta	Estado plano de deformación ($B > 25 CTOD_C$)

3.3.1 Estudios de Mecánica de Fractura con *CTOD*

En la investigación de Pettarin *et al.*[45], se realizaron inicialmente estudios basados en la metodología del Trabajo Esencial de Fractura para determinar los parámetros de fractura en diferentes polímeros (Vestolem, P9421, Lustran y ABS-740); esta investigación consistió en ensayos con probetas tipo Charpy a altas velocidades de deformación donde se estimó la influencia de la longitud de la grieta. Uno de los resultados de este trabajo fue que a través del ensayo Charpy no se puede caracterizar la tenacidad a fractura con exactitud en estos materiales por su alta ductilidad encontrada en la punta de la grieta, lo que generó como principal conclusión recomendar la implementación de la integral J y el método de CTOD para la caracterización a fractura.

Por otro lado, en el año 2009 Frank *et al.*[46] desarrollaron un estudio de caracterización en mecánica de fractura lineal elástica a través de la velocidad de crecimiento de grietas para dos grados de polietilenos de alta densidad (PE-80 y PE-100). Las probetas utilizadas fueron barras redondas obtenidas por extrusión. La pre-grieta fue obtenida a través de ensayos a fatiga. Como resultado de este trabajo se obtuvieron curvas de velocidad de crecimiento de grietas ($\log da/dN$ vs $\log \Delta k$) para ambos materiales a diferentes relaciones de esfuerzo (R). Adicional a lo señalado, también se pudieron obtener resultados preliminares de la apertura de las superficies de fracturas a través del método CTOD sin llegar a especificar valores de δ_{IC} para las muestras de PEAD estudiadas.

Posteriormente, Muñoz [47] presenta su tesis doctoral titulada “Tensiones residuales generadas en la zona afectada por el calor (Z.A.C.) y su influencia en la tenacidad a la fractura en los aceros microaleados (H.S.L.A.) utilizados en la industria naval y costa afuera bajo un proceso de soldadura por arco sumergido”. En esta investigación se llevaron a cabo diversos ensayos para determinar la tenacidad a la fractura a través del CTOD del material en su zona afectada por el calor (ZAC), con soldaduras realizadas en el proceso SAW, esto con el fin de establecer una relación cuantitativa entre los resultados de los ensayos realizados y la tenacidad a la fractura de la Z.A.C. Se analizaron los parámetros que tienen influencia directa en la microestructura, como la dureza, y que afectan sus propiedades mecánicas. Entre las principales conclusiones obtenidas en los ensayos de mecánica de fractura, sobre las probetas utilizadas para CTOD H.A.Z, en el proceso de soldadura SAW, se verificó que los ensayos CTOD fueron válidos conforme a la norma utilizada.

Como se evidencia, no se han desarrollado trabajos de mecánica de fractura en tuberías de PEAD aplicando el método de *CTOD*. Las pocas investigaciones se basan en pruebas preliminares en otros tipos de polímeros y aceros.

En la tabla 4 se presenta un resumen con la información general de las investigaciones experimentales realizadas en mecánica de fractura utilizando la técnica *CTOD*.

Tabla 4. Investigaciones experimentales en Mecánica de Fractura con *CTOD*., 2018

Autor (es)	Año de publicación	Título de la investigación	Material de las probetas
Pettarin <i>et al.</i>	2004 (Paper)	Optimal ligament lengths in impact fracture toughness estimation by the essential work of fracture method	Vestolem, P9421, Lustran, ABS
Frank <i>et al.</i>	2009 (Paper)	A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades	PE-80 y PE-100
Muñoz A.	2009 (Tesis Doctoral)	Tensiones residuales generadas en la Z.A.C y su influencia en la tenacidad a la fractura en los aceros H.S.L.A, bajo un proceso de soldadura por arco sumergido.	Aceros microaleados (H.S.L.A.)

4. Conclusiones

En general se observó que el comportamiento a fractura de las tuberías fabricadas con PEAD (PE-100 y PE-80) ha sido poco estudiado en los últimos años. Este aspecto es de gran relevancia considerando el gran rango de aplicación que se tiene en la actualidad y que se proyecta para las próximas décadas. La caracterización a fractura completa utilizando las teorías de la MFEP (como la integral $J-K_I$) permitiría generar el conocimiento técnico-conceptual del comportamiento mecánico de estas tuberías bajo la presencia de grietas o defectos, de tal manera de aportar propiedades mecánicas que ayuden a mejorar los procesos de diseño de estas tuberías.

Finalmente, otro resultado importante producto de esta investigación es la evidencia de que no se han desarrollado trabajos en tuberías de PEAD aplicando el método de *CTOD*. Las pocas investigaciones existentes se basan en pruebas preliminares en otros tipos de polímeros y en aceros. La caracterización con el *CTOD* permitiría ampliar el rango de aplicación de estas tuberías, ya que el método genera especificaciones requerida por las normas nacionales venezolanas (COVENIN) e internacionales (ASTM) para el control de calidad de materiales con un alto grado de ductilidad, basado en controlar los desplazamientos como principal enfoque en la etapa de diseño.

En resumen, se concluye que esta investigación posibilitará desarrollar estudios que generen nuevos conocimientos de propiedades mecánicas a fractura basadas en técnicas que complementen las existentes y que permitan establecer códigos y/o protocolos de diseños más precisos, donde se pueda generar un criterio actualizado en el diseño de tuberías fabricadas con PEAD.

Referencias

[1] J. L. Arana and J. J. González, *Mecánica de Fractura*, 3rd ed. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002.

[2] R. R. Machado G, “Análisis a Fatiga para Polietilenos de Alta Densidad utilizados en tuberías,” Universidad Simón Bolívar Venezuela, 2009.

[3] F. Zakar and M. Budinski, “Fracture of a saddle fusion (weld) joint in high density polyethylene (HDPE) pipe,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 82, pp. 481–492, 2017. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.03.009.

[4] M. C. Olmos Rodriguez And L. C. Peláez Lenis, “Plan De Empresa Para La Creación De Recoplast, Empresa Dedicada A La Recuperación De Productos Plásticos Reciclables,” Universidad Autónoma De Occidente, 2018.

[5] Revinca, “Literatura técnica,” *Revinca*, 2013. . [Online]. Available: <http://www.revinca.com/>

[6] Polinter, “Polietilenos de Alta Densidad para Tuberías,” Caracas, 2017.

[7] J. P. Freire Triana and V. I. Sánchez Santamaría, “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. Carrera de Ingeniería Civil., 2018.

[8] A. Adib, C. Domínguez, J. Rodríguez, C. Martín, and R. A. García, “The effect of microstructure on the slow crack growth resistance in polyethylene resins,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 55, no. 5, pp. 1018–1023, May 2015. doi: 10.1002/pen.23970.

[9] D. D. Barboza Elera and D. Rimapa Llanos, “Proyecto de Pre-Factibilidad de instalación de una Planta de Producción Polietileno a Partir de Etileno,” Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2018.

[10] C. Domínguez Vizcaya, “Estudio del proceso de crecimiento lento de grieta en el polietileno de alta densidad para su aplicación en tubería,” Universidad Rey Juan Carlos, 2009.

[11] Hidrofalcón, “Informe de gestión II trimestre,” Estado Falcón, 2012.

[12] H. E. Jaramillo, N. C. Alba, J. P. Cañizales, and A. J. Toro, *Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008.

[13] O. A. Jiménez Arevalo, “Comportamiento a la fractura de composites con matriz de poliestireno,” Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2003.

[14] E. Oral, A. S. Malhi, and O. K. Muratoglu, “Mechanisms of decrease in fatigue crack propagation resistance in irradiated and melted UHMWPE,” *Biomaterials*, vol. 27, no. 6, pp. 917–925, Feb. 2006. doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.06.025.

[15] M. Parsons, E. V Stepanov, A. Hiltner, and E. Baer, “Effect of strain rate on stepwise fatigue and creep slow

- crack growth in high density polyethylene,” *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 8, pp. 1857–1866, 2000. doi: 10.1023/A:1004741713514.
- [16] N. Merah, F. Saghir, Z. Khan, and A. Bazoune, “A study of frequency and temperature effects on fatigue crack growth resistance of CPVC,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 72, no. 11, pp. 1691–1701, Jul. 2005. doi: 10.1016/j.engfracmech.2004.12.002.
- [17] V. Favier *et al.*, “Slow crack propagation in polyethylene under fatigue at controlled stress intensity,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 43, no. 4, pp. 1375–1382, 2002. doi: 10.1016/S0032-3861(01)00701-7.
- [18] M. L. Maspoch Rulduà, “Estudio De La Fractura De Materiales Compuestos Por Una Matriz De Plastico Y Partículas Elastoméricas,” Universitat Politècnica De Catalunya, 1992.
- [19] J. Niglia, C. Bernal, A. Cisilino, and P. Frontini, “Determinación de Parámetros de Mecánica de Fractura en Polietilenos para Tuberías de transportes de fluidos en la industria del Gas y Petróleo,” in *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, 2000.
- [20] M. Sánchez Soto, “Comportamiento mecánico y fractura de mezclas de poliestireno y microesferas de vidrio,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [21] D. Ferrer Balas, “Aplicación del Método del Trabajo Esencial de Fractura al estudio de films de Polipropileno y de Copolímeros Propilenos –Etileno en Bloques,” Barcelona, 2001.
- [22] G. M. Rojas, M. Rink, and A. J. Müller, “Aplicación Del Trabajo Esencial De Fractura A Copolímeros De Etileno Y A-Olefina De Diversos Porcentajes De Cristalinidad Y Comportamientos Mecánicos,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 22, scielon, pp. 66–72, 2002.
- [23] D. R. Moore, J. G. Williams, and A. Pavan, *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites*. Elsevier Science, 2001.
- [24] I. M. Graice, M. Y. A. Younan, and S. A. R. Naga, “Experimental Investigation Into the Fracture Toughness of Polyethylene Pipe Material,” *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 127, no. 1, pp. 70–75, Mar. 2005. doi: 10.1115/1.1845478.
- [25] M. Mireya *et al.*, “Propiedades Mecánicas y Comportamiento a Fractura de un Polipropileno Homopolímero comparado con un Copolímero de impacto grado comercial,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 25, Scielon, pp. 31–45, 2005.
- [26] H. J. Kwon and P.-Y. B. Jar, “Toughness of high-density polyethylene in plane-strain fracture,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 46, no. 10, pp. 1428–1432, Oct. 2006. doi: 10.1002/pen.20603.
- [27] H. J. Kwon and P.-Y. B. Jar, “Application of essential work of fracture concept to toughness characterization of high-density polyethylene,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 47, no. 9, pp. 1327–1337, Sep. 2007. doi: 10.1002/pen.20814.
- [28] R. Schouwenaars, V. H. Jacobo, E. Ramos, and A. Ortiz, “Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 14, no. 6, pp. 1124–1134, 2007. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.066.
- [29] A. Martínez, P. Artús, J. C. Dürsteler López, and D. Arencon, “Comportamiento a la fractura de materiales para lentes oftálmicas,” in *XXV Encuentro del Grupo Español de Fractura*, 2008, pp. 269–274.
- [30] A. Salazar, J. Rodríguez, O.O. Santana, And A. Martínez, “Influencia De Los Parámetros Estructurales En El Comportamiento A Fractura De Copolímeros En Bloque Etileno-Propileno,” In *XXVI Encuentro Del Grupo Español De Fractura*, 2009.
- [31] H. Ge, G. Singh, and S. C. Mantell, “Fracture behavior of degraded polyethylene thin films for solar thermal applications,” *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 783–792, 2012. doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.089.
- [32] A. Djebli *et al.*, “Uniaxial Fatigue of HDPE-100 Pipe. Experimental Analysis,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 600–604, Jan. 2014.
- [33] F. M. Peres, J. R. Tarpani, and C. G. Schön, “Essential Work of Fracture Testing Method Applied to Medium Density Polyethylene,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 3, pp. 756–763, 2014. doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.124.
- [34] T. M. A. A. El-Bagory, H. E. M. Sallam, and M. Y. A. Younan, “Evaluation of Fracture Toughness Behavior of Polyethylene Pipe Materials,” in *ASME 2014 Pressure Vessels and Piping*, 2014, p. 10. doi: 10.1115/PVP2014-28407

[35] J. Zhu, R. P. Collins, J. B. Boxall, R. S. Mills, and R. Dwyer-joyce, "Non-Destructive In-Situ Condition Assessment of Plastic Pipe Using Ultrasound," *Procedia Eng.*, vol. 119, pp. 148–157, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.866.

[36] A. Salazar, J. Rodríguez, F. Arbeiter, G. Pinter, and A. B. Martínez, "Fracture toughness of high density polyethylene: Fatigue pre-cracking versus femtolaser, razor sharpening and broaching," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 149, pp. 199–213, 2015. doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.07.016.

[37] T. El-Bagory, H. Sallam, and M. Younan, "Validation of Linear Elastic Fracture Mechanics in Predicting the Fracture Toughness of Polyethylene Pipe Materials," in *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2015. doi: 10.1115/PVP2015-45651.

[38] T. El-Bagory, T. Alkanhal, and M. Younan, "Effect of Specimen Geometry on the Predicted Mechanical Behavior of Polyethylene Pipe Material," in *ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2014. doi: 10.1115/PVP2014-28401.

[39] Y. Zhang and P.-Y. Ben Jar, "Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, no. 10, pp. 4326–4332, Oct. 2016. doi: 10.1007/s11665-016-2274-2.

[40] G. Márquez, "Estudio de la Mecánica de Fractura de mezclas PEAD/PEUAEM Reciclados," Universidad Simón Bolívar Venezuela, 2017.

[41] González A. "Comportamiento a la Fractura de Mezclas de PEAD con PEUAEM Reciclados," Universidad Simón Bolívar Venezuela, 2015.

[42] A. Kalantar Mehrjerdi, S. Naudin, and M. Skrifvars, "Development of Polyolefin Compound and Post-Polymerization Treatments for Ground Heat Exchangers," in *IGSHPA Technical/Research Conference and Expo*, 2017.

[43] S. Kannappan, *Introduction to pipe stress analysis*. Wiley, 1986.

[44] R. Goncalves, *Introducción al análisis de esfuerzos*, 3ra ed. Equinoccio, 2008.

[45] V. Pettarin, P. M. Frontini, and G. E. Elicabe, "Optimal ligament lengths in impact fracture toughness estimation by the essential work of fracture method," *Polym. Test.*, vol. 24, no. 2, pp. 189–196, 2005. doi: 10.1016/j.polymertesting.2004.09.003.

[46] A. Frank, W. Freimann, G. Pinter, and R. W. Lang, "A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 76, no. 18, pp. 2780–2787, 2009. doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.06.009.

[47] A. Muñoz Rubio, "Tensiones residuales generadas en la zac y su influencia en la tenacidad a la fractura en los aceros de hsla, bajo un proceso de soldeo por arco sumergido," Universidad de Cádiz, 2009.

Abreviaturas

ASME	American Society for Testing and Material
COVENIN	Comisión Venezolana de Normas Industriales
HDPE	Polietileno de Alta Densidad (en sus siglas en ingles)
ESIS	European Structural Integrity Society
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
PP	Polipropileno
R	Relación de esfuerzos
K	Factor de intensidad de esfuerzos en MFLE
K_I	Factor de intensidad de esfuerzo en condiciones elastoplásticas.
Δa	Crecimiento de grieta
EW _F	Trabajo esencial de fractura (en sus siglas en ingles)
ω_e	Trabajo esencial de fractura
ω_p	Trabajo no esencial
B	Espesor
σ_y	Esfuerzo de fluencia
$CTOD_c$	CTOD Crítico (δ_{IC})
J_{IC}	Resistencia al inicio de propagación de la grieta
G_{IC}	Rapidez de liberación de energía en el agrietamiento
σ_{xx}	Esfuerzo de la punta de la grieta- eje x
σ_{yy}	Esfuerzo de la punta de la grieta- eje y
τ_{xy}	Esfuerzo cortante en la punta de la grieta – eje xy
σ_{zz}	Esfuerzo de la punta de la grieta- eje z
σ_{MAX}	Esfuerzo Máximo
ν	Módulo de Poisson