Caso de estudio de fractura en polímeros

PAPIME-PE103822
Implementación de prácticas experimentales a distancia y presenciales para la asignatura de Deterioro de Materiales en la Facultad de Ingeniería

1.Introducción

El presente trabajo se enfocará en analizar la fractura mecánica como tema principal, pues en la actualidad existe un gran número de elementos en obras civiles, equipos de aeronáutica, plataformas inmersas en el mar (off-shore), incluso depósitos o recipientes, los cuales están diseñados y sometidos a un previo análisis respecto a una posible fractura. La mecánica de fractura se ha impulsado desde los materiales metálicos utilizados en ingeniería para la fabricación de componentes en maquinaria, componentes estructurales, etc. Los cuales, a lo largo del tiempo han presentado fracturas significantes que orillan a los ingenieros al estudio y a una correcta modelización del comportamiento de ciertos materiales ante el sometimiento de cargas que lo lleven a presentar una fractura. Dicho esto, no se quiere dar a entender que solo los materiales metálicos presenten roturas frágiles, pues también se incluyen los materiales naturales como lo son la madera, la arcilla, piedra, así como materiales cerámicos (ladrillos, hormigones, etc), poliméricos y materiales compuestos, los cuales son todos a su vez objeto de estudio. Además, se logrará demostrar la importancia que tiene el estudio y análisis previo de diversos componentes que nos permitan aumentar la seguridad de los diseños en las estructuras o cualquier otro elemento dentro de la industria.

Específicamente el trabajo se enfoca en dar a conocer los mecanismos de fractura en polímeros y sus similitudes y diferencias con la fractura en materiales metálicos, esto con el objetivo de conocer más sobre el fenómeno de la fractura en materiales poliméricos, esto debido a que el estudio de las fracturas en los polímeros no es tan amplia a pesar de que estos han tenido amplio desarrollo y aplicaciones desde finales del siglo pasado. La mayoría de polímeros aplicados consisten en piezas o elementos que en general no están sometidos a esfuerzos muy grandes, pero existen casos como el de las tuberías plásticas para el transporte de gas o agua que si presentan solicitaciones importantes y por lo cual están propensas a fracturas que pueden representar un gran riesgo en industrias como la petrolera, sin mencionar que hay diversos tipos de polímeros aplicados en una infinidad de equipos, y objetos de uso diario e industrial que requieren de ser estudiados para mejorar sus propiedades y así aumentar su calidad y durabilidad del producto o equipo.

2. Antecedentes

2.1. Teoría clásica de la resistencia de materiales.

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. [1Haga clic o pulse aquí para escribir texto.]

2.2. Tipos de fractura.

La fractura se puede definir como la culminación del proceso de deformación plástica, la cual se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido ya sea en una o más partes bajo un estado de cargas. [3]

Una **fractura frágil** es aquella en la que la grieta se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, y por otro lado, una **fractura dúctil** es aquella en la que hay una gran deformación plástica asociada con el extremo de la grieta. Sin embargo, otra forma en la que podemos clasificar a las fracturas es a partir del proceso en el que esta se produce, ya sea de manera rápida o lenta. De esta manera, podemos entender a la **fractura rápida** como aquella que se caracteriza por una propagación inestable de la grieta en una estructura o en algún otro elemento mecánico. En otras palabras, una vez que la grieta comienza a expandirse, el sistema de cargas es tal que producirá una propagación de la grieta de manera acelerada. Por su parte, una **fractura lenta** se caracteriza por presentar una propagación estable, la cual requiere un incremento continuo de las cargas aplicadas para su mantenimiento. [3]

La fractura causada por el crecimiento inestable de una grieta, puede tener lugar bajo un estado biaxial ya sea de esfuerzo plano o bajo un estado triaxial de esfuerzos de deformación plana en la vecindad del frente de la grieta generada.

Una fractura en un estado de esfuerzo plano presentará una mayor tenacidad comparada con una fractura en estado de deformación plana. Esto debido a que el estado biaxial de esfuerzo inducido en el frente de la grieta permitirá una mayor deformación plástica y una distribución de esfuerzos más adecuada para lograr una mayor resistencia a la fractura a causa de un crecimiento inestable de la grieta. [2]

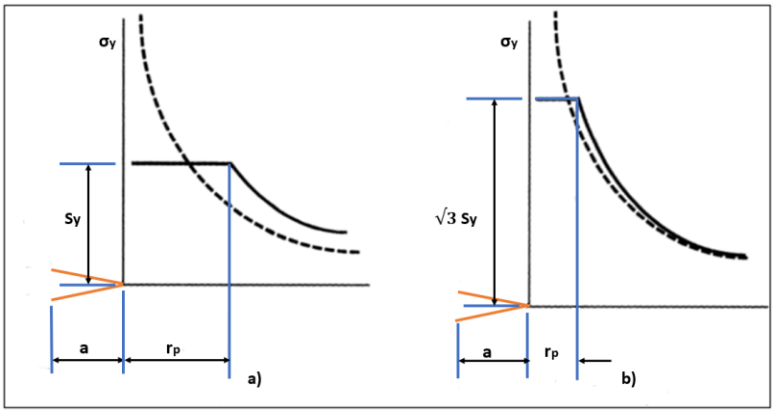


Figura 1. Distribución de esfuerzo y zona plástica en la vecindad del frente de grieta. Donde a) Esfuerzo plano y) Deformación plana.

Una **fractura inclinada** o la formación de labios cortantes en la fractura se produce cuando en una placa sometida a un esfuerzo nominal de tracción simple, en la cual se encuentre una grieta perpendicular a la dirección del esfuerzo aplicado, y que este bajo un esfuerzo plano en el frente de grieta, los planos de fractura usualmente seguirán los planos del esfuerzo cortante máximo en dicha zona, los cuales se van a presentar en planos a ±45° respecto con el plano de la superficie y con la dirección de carga aplicada.

Por su parte, en una fractura ocasionada por la propagación inestable de una grieta bajo un estado de deformación plana ubicada en la vecindad del frente de la misma, el crecimiento de la grieta tendrá lugar con una pequeña zona plástica así como en un ambiente de esfuerzo triaxial. De esta manera y con estas condiciones, se genera una **fractura plana o fractura cuadrada.** Fractura en la cual se presentan pequeños labios de fractura cortante cerca de las superficies libres debido a que en ellas está presente un estado de esfuerzo plano. [2]

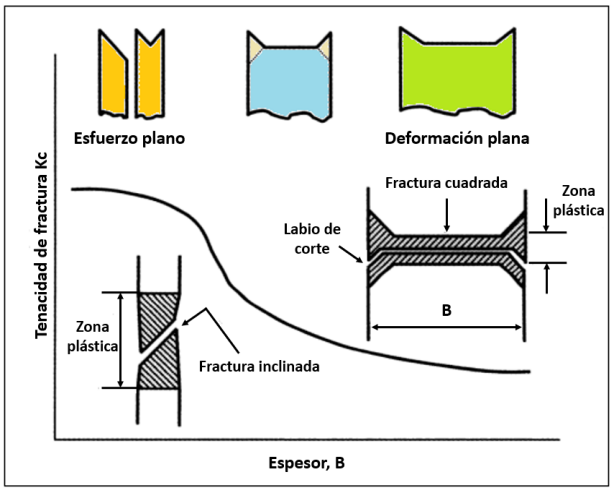


Figura 2. Ilustración de la variación de la tenacidad de fractura y de la apariencia de fractura en relación con el espesor.

Cuando en el frente de una grieta se presenta una zona plástica de un tamaño pequeño la cual está rodeada por una zona de esfuerzos elásticos, el crecimiento de una grieta tendrá lugar cuando la intensidad de esfuerzo **K1** alcanza un valor crítico denominado por **Kc.** Por lo general, , conforme la grieta va creciendo, varía tanto **K1** como **Kc**, debido a que un incremento de una grieta implica un aumento del tamaño de la misma y por lo tanto, un aumento del tamaño de la zona plástica, y debido a que un incremento de grieta puede ocasionar una disminución de la rigidez y del esfuerzo en uno o varios componentes estructurales.

En un estado de deformación plana en el frente de una grieta, el incremento de la tenacidad **KIC** junto con el incremento de grieta usualmente es pequeño, por lo que bajo una carga sostenida, una vez que ha comenzado el crecimiento de la grieta, se mantiene la condición de que **K1 ≥ KIC** dándonos a entender que se tiene un crecimiento inestable de la grieta hasta que se llega a la fractura. Por el contrario, cuando se tiene un estado de esfuerzo plano en el frente de la grieta, bajo una carga sostenida, se puede dar inicio al crecimiento de la grieta sin que esta avance debido a que **Kc** aumenta a una tasa mayor que **K1** con un cierto incremento de grieta; por lo que para lograr un avance en el incremento de la misma, será necesario aumentar el esfuerzo, conociendo a este proceso como un crecimiento estable de grieta, el cual puede continuar hasta llegar a la fractura final. [2]

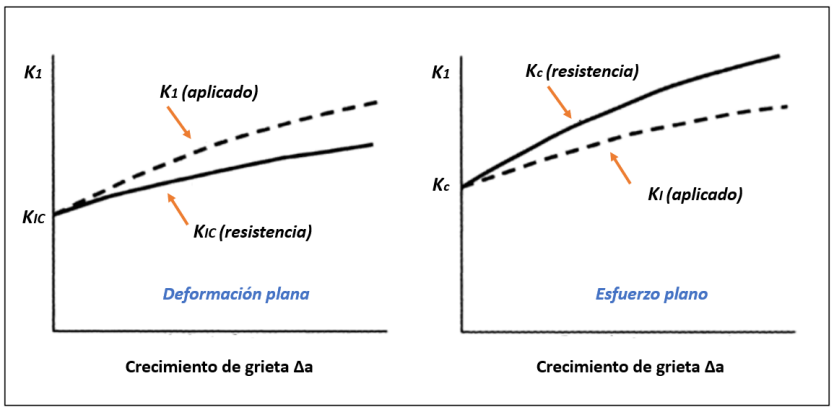


Figura 3. (a) Iniciación y crecimiento inestable de la grieta.
(b) Iniciación, pero sin avance del crecimiento de la grieta.

Las fallas de los componentes y algunas estructuras se deben en la mayoría de los casos por fractura ocasionada por la propagación de una o más grietas. Por ello, podemos distinguir tres formas o tres modos diferentes de fractura ocasionada por la propagación de grietas contenidas en un cuerpo.

Es importante saber que la forma en la cual se propaga una grieta va a depender de las condiciones en las cuales la carga es aplicada, así como en que la propagación puede ser estable o inestable. La propagación inestable de una grieta frecuentemente conlleva a consecuencias catastróficas, por lo cual se le suele conocer como fractura frágil debido a que presenta una baja deformación plástica en el vértice de la grieta. Ahora, bajo condiciones de fatiga, así como cargas cíclicas repetidas, el avance de las grietas es inevitable y puede ocasionar una fractura de manera rápida. Por este motivo, es necesario poder estimar la velocidad en la que la grieta va creciendo para que a partir de ello se pueda determinar la vida útil que puede tener un componente dado. [3]

2.3. Modos de fractura

En la figura 4 podemos observar los tres modos posibles de la separación de una placa transversal la cual está agrietada en su borde. El **modo I** es conocido como “modo de apertura” y está asociado con cargas axiales de tensión las cuales tienden a separar los bordes de la grieta. Es importante aclarar que se utiliza el subíndice **I** para denotar a los parámetros relacionados con este primer modo de fractura, por lo que el factor de intensidad de esfuerzos para el modo I de fractura se designa como **KI.**

Por su parte los **Modos II y III** son modos fundamentalmente de ruptura por cortante, los cuales tienden a deslizar una de las caras de la grieta con respecto a la otra. Además, los esfuerzos y deformaciones en el modo II permanecen en el plano de la pieza, mientras que el modo III corresponde a un esfuerzo cortante pero fuera del plano. De este modo, un cuerpo agrietado puede estar sometido a cualquiera de los tres modos o a una posible combinación de estos mismos.

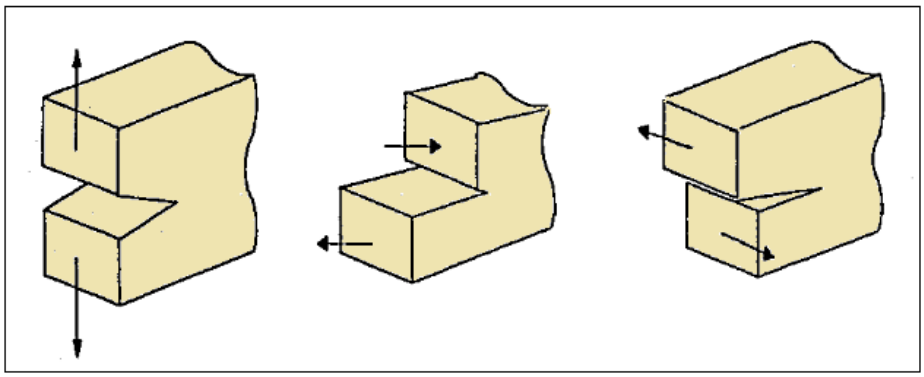


Figura 4. Modos de fractura (I, II y III respectivamente).

Cabe recalcar que el **modo I** es la forma más común de fractura, así como el más utilizado para el análisis de esfuerzos. Se han realizado algunos análisis de esfuerzo y mediciones respecto al factor crítico de intensidad de esfuerzos en relación con los modos II y III, sin embargo estos son de

alcance limitado. Es por ello que a partir del modo I se haya creado gran parte de la teoría de mecánica de la fractura. [3]

3. Desarrollo

El estudio de la mecánica de la fractura ha tenido un amplio desarrollo en materiales metálicos debido a su amplio uso dentro de diferentes industrias. 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 diferentes procesos de manufactura como el de tuberías entre otros.[1]

Para conocer el comportamiento en fractura de los polímeros necesitamos conocer algunas de las propiedades generales de los polímeros como su estructura molecular, los enlaces principales y secundarios y la diferencia entre materiales poliméricos cristalinos y amorfos.

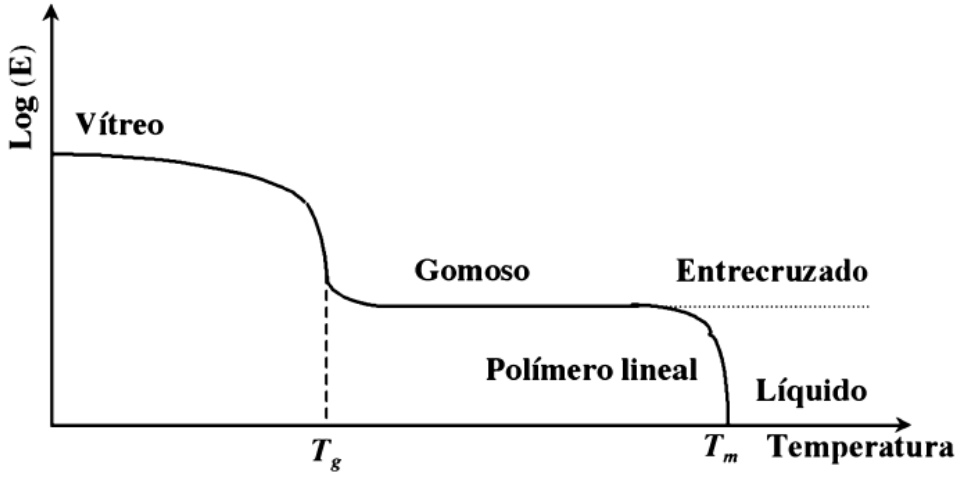
Al igual que los metales, los polímeros pueden soportar deformación tanto elástica como plástica cuando se aplica un esfuerzo. La deformación elástica se debe a dos mecanismos de estirado y distorsión de los enlaces dentro de la cadena y movimiento recuperable de segmentos completos de las cadenas. La deformación plástica de los polímeros se produce cuando las cadenas en el polímero se deslizan una sobre otra rompiendo los enlaces débiles de van der Waals.

La facilidad con la que se deforman los polímeros está relacionada con la viscosidad de estos, siendo que para polímeros con alta viscosidad sea necesario aplicar mayores esfuerzos. Cuando un polímero se calienta este tiende a ser menos viscoso permitiendo que se deformen con mayor facilidad.

Los polímeros amorfos agrupan a la mayoría de las familias de polímeros, siendo constituidos por cadenas poliméricas que se ordenan de forma irregular, se enroscan y “amarran” entre sí dándole las características plásticas que conocemos. Por debajo de la temperatura de transición vítrea Tg, el polímero lineal se vuelve duro y frágil, se comporta de modo parecido a un vidrio cerámico y las propiedades tales como el módulo de elasticidad o la densidad, cambia a una velocidad diferente cuando la temperatura cae por debajo de Tg. La temperatura de transición vítrea está comprendida habitualmente entre 0,5 y 0,75 veces la temperatura absoluta de fusión Tm. [4]

Los polímeros tienen un comportamiento viscoso que depende del tiempo, que se debe a su estructura molecular. La estructura molecular juega un papel importante particularmente los enlaces principales y los enlaces secundarios o de Van der Waals. El módulo de elasticidad es

bastante más bajo que el módulo de Young de los metales y cerámicas, porque las fuerzas de van der Waals suponen enlaces más débiles que los enlaces primarios.

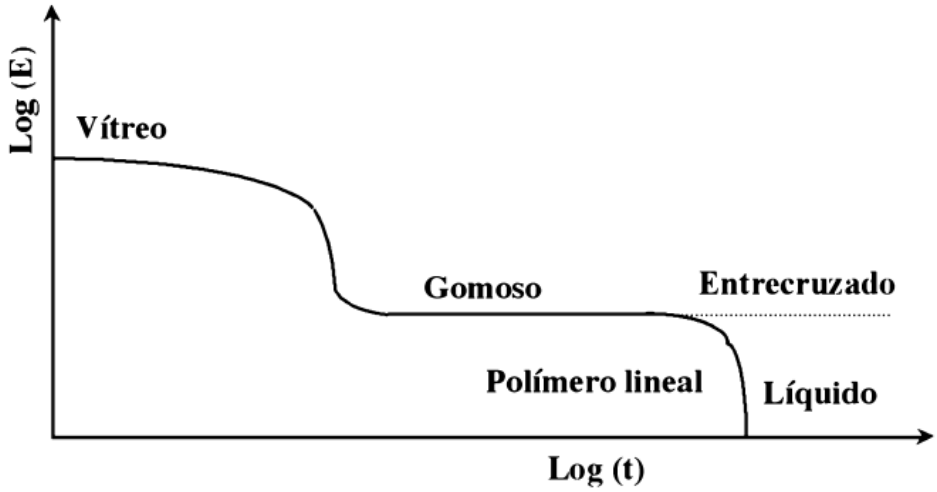


$$E(t) = \frac{\sigma\,(t)}{\varepsilon_0} \qquad (1)$$

$$D(t) = \frac{\varepsilon\,(t)}{\sigma_0} \qquad (2)$$

Siendo **E(t)** el módulo de Young y **D(t)** el módulo de relajación.

La viscoelasticidad de los polímeros no solo depende de la temperatura, también depende del tiempo. Para tiempos cortos el polímero es vítreo, pero presentan un comportamiento plástico, incluso gomoso y finalmente líquido a medida que aumenta el tiempo de mantenimiento a la temperatura predeterminada. Naturalmente la magnitud del tiempo necesario para alcanzar alguno de los estados indicados es variable en función de la temperatura de que se trate. [4]



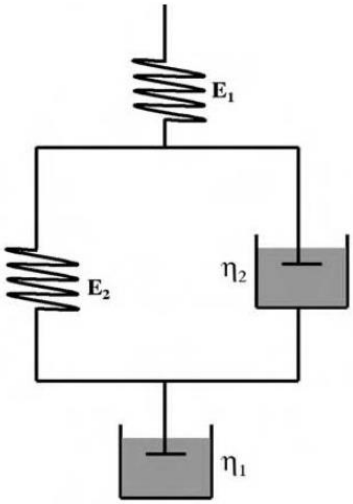
A diferentes tiempos en una curva módulo-temperatura, que define un factor de tiempo **aT**:

$$\log \alpha_T = \log \frac{t_T}{t_{T_0}} = \frac{C_1\,(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \qquad (3)$$

Donde **tT** y **tT0** son los tiempos para alcanzar un módulo específico a las temperaturas **T** y **T0**, respectivamente. **T0** es la temperatura de referencia que normalmente se define como **Tg** y **C1** y **C2** son parámetros que dependen de las propiedades del material.

Para entender la respuesta mecánica de los polímeros se suele emplear modelos mecánicos como una analogía. El modelo más conocido es el modelo de Maxwell, que consiste en un muelle y un amortiguador en serie, mientras que el modelo de Voigt contiene los mismos elementos en paralelo; existe un tercer modelo que combina los modelos Maxwell y Voigt.

El modelo de Maxwell no tiene en cuenta la recuperación viscoelástica, porque la deformación en el amortiguador no es reversible cuando cesa la tensión. El modelo de Voigt no puede ser aplicado al caso de la relajación de tensiones, porque cuando la deformación es fija, toda la tensión está soportada por el muelle y el problema se reduce a una simple carga estática, en la que la tensión y la deformación permanecen constantes. Si combinamos ambos modelos, como se ve en la Figura 7.4, obtenemos un modelo de comportamiento más versátil y realista. En este caso las deformaciones son sumatorias, y la tensión soportada por el muelle de Maxwell y el amortiguador se divide entre el muelle de Voigt y el amortiguador.



La ecuación comúnmente usada para ensayos de fluencia en polímeros es la siguiente:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2}\left(1 - e^{\frac{-t}{t_{R\,(2)}}}\right) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_1} \qquad (4)$$

En los metales las dos formas de agotamiento son la plastificación generalizada y la fractura, normalmente los materiales sometidos a esfuerzos importantes plastifican y en los materiales frágiles se llega a la fractura antes de completarse el proceso de plastificación, de ahí que los materiales dúctiles, por definición, son aquellos que alcanzan un grado importante de plastificación antes de presentar una fractura.

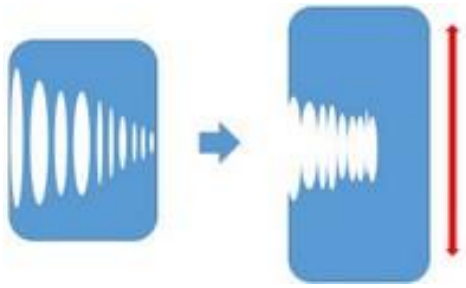
En términos generales, los polímeros no son muy distintos de los metales, pero los procesos de plastificación y fractura son diferentes desde un punto de vista microscópico. Los polímeros no tienen planos cristalográficos, ni dislocaciones, ni bordes de grano, y teniendo en cuenta que la fractura a escala atómica supone una rotura de los enlaces atómicos, en el caso de los polímeros hay que considerar que tienen dos tipos de enlace: el primario molecular y los enlaces secundarios que son fuerzas de van der Waals entre segmentos de molécula. La fractura requiere la rotura del enlace primario molecular pero los enlaces secundarios juegan un papel importante en los mecanismos de deformación que preceden a la fractura. [4]

La fractura de polímeros implica por lo tanto la separación material de la cadena del polímero a nivel atómico, lo que podría entenderse como una gran resistencia a fractura, sin embargo, hay varios aspectos que hacen disminuir extraordinariamente esta aparente resistencia: en primer lugar la presencia de pequeños defectos internos que actúan como pequeñas grietas con una alta

concentración local de tensiones, y en segundo lugar el hecho de que las cadenas poliméricas no se encuentran solicitadas uniformemente, sino que las tensiones se reparten de manera muy desproporcionada respecto a la carga aplicada, condicionando que algunos enlaces moleculares alcancen el nivel de tensión de rotura. [4]

Ahora, dentro de los polímeros existe un tipo de fractura conocida como *crazing*, esta consiste en la formación de micro huecos en un polímero semicristalino cuando se le aplica alguna tensión, las cadenas de ligamento entre lamelas adyacentes comienzan a separarse y se desenredan, para terminar formando un micro hueco a lo largo del plano de máxima deformación.

Este fenómeno es propio de polímeros que estiran a temperaturas mayores a las ambientales como el poliestireno, el crazing se caracteriza por ser una deformación localizada que forma micro huecos, a nivel macroscópico podemos identificar la zona *craze* por el característico color blanco que toma el material. Los crazes son fácilmente visibles a simple vista y son precursores de la fractura.



El comportamiento del *crazing* se puede expresar con la ecuación de Dugdale que a continuación se presenta.

$$\rho = \frac{\pi}{8}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_c}\right)^2 \qquad (5)$$

Aunque algunos aspectos de la fractura de los materiales poliméricos pueden ser parecidos a los de los metales, una de las más importantes diferencias es la importante influencia del tiempo en el comportamiento mecánico en la fractura

Se han hecho importantes intentos para caracterizar la tenacidad a fractura K_I de los plásticos de ingeniería, sin embargo, los procedimientos experimentales existentes en la actualidad no están especialmente indicados para tener en cuenta la viscoelasticidad.[4]

En la investigación de Pettarin et al. [4], 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.

Los valores de JIC pueden ser válidos cuando caracterizamos un plástico razonablemente tenaz, sin embargo, cuando el material presenta un comportamiento dependiente acusadamente del tiempo, es más adecuada la integral viscoelástica Jv que está dada por la siguiente expresión.[4]

$$J_v = -\frac{1}{B}\left[\frac{\partial}{\partial a}\int_0^{\Delta^e} P \; d\Delta^e\right]\Delta^e \qquad (6)$$

Donde P es la carga aplicada a la probeta por unidad de espesor y la curva P-Δe es la curva de carga desplazamiento pseudo-elástico, no lineal y dependiente del tiempo que sigue una ley del tipo: P = M (Δe)N, siendo M y N parámetros independientes del tiempo; N es una propiedad del material, mientras que M depende del material y de la geometría de la probeta. Para un material viscoelástico lineal, tendremos que N = 1 y M es la rigidez elástica. Según la ley potencial anterior, resulta:

$$J_v = -\frac{(\Delta^e)^{N+1}}{N+1}\left(\frac{\delta M}{\delta a}\right)_{\Delta^e} \qquad (7)$$

Jv puede ser evaluada directamente, por unidad de espesor, a partir del área bajo la curva P-Δe:

$$J_v = \frac{\eta}{b} \int_0^{\Delta^e} P\, \Delta^e \qquad (8)$$

Donde P es la carga por unidad de espesor B y η es un parámetro dependiente de la geometría y con la ley potencial P = M (Δe)N y comparando ambas expresiones de Jv:

$$\eta = -\frac{b}{M} \left(\frac{\delta M}{\delta a}\right)_{\Delta^e} \qquad (9)$$

Por tanto, el valor J sería:

$$J = \frac{\eta}{Bb} \int_0^{\Delta} P\, d\Delta \qquad (10)$$

A lo largo de los últimos años ha surgido la necesidad de realizar ensayos de diferentes polímeros para determinar sus propiedades y entender de qué manera y por qué procesos pueden fracturarse, durante nuestra investigación nos encontramos con un artículo titulado Estado del arte sobre la mecánica de fractura en tuberías de polietilenos de alta densidad (PEAD), este trabajo recopila varios trabajos de las últimas décadas que hayan estudiado propiedades de polímeros PEAD[1], que son ampliamente usados para fabricar tuberías de plástico con diferentes aplicaciones, con el fin de conocer la situación actual de los estudios experimentales de mecánica de fractura desarrollados en tuberías fabricadas en PEAD, dando a conocer las técnicas utilizadas y los campos de estudio que todavía no se han abordado.

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

La tabla presente resume parte de los estudios recopilados, dando el años de publicación, el polímero estudiado y la técnica empleada para estudiar las propiedades de dicho material, siendo Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP), Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) y, Trabajo Esencial de Fractura (EWF) siendo los modelos de referencia para trabajar con propiedades de materiales poliméricos.

4. Resultados

En esta investigación sobre fractura en polímeros se encontró que hay algunas similitudes con los mecanismos de fractura en los materiales metálicos, pero predominan diferencias como el de la viscoelasticidad y viscoplasticidad que evitan que en materiales poliméricos se puedan efectuar ciertos ensayos experimentales por la alta plasticidad que suelen tener estos materiales, también se entendió como la temperatura afecta la plasticidad de los polímeros y se revisaron los modelos de Maxwell y Voigt, que serían conceptos básicos, junto con el de integral J, para realizar análisis en polímeros.

De esta investigación también observamos que los estudios de fractura en polímeros es un campo en pleno desarrollo ya que no se encuentran tantos artículos enfocados en estudiar fractura en

polímeros, y los métodos para estudiarlos actualmente son limitados siendo las teorías MFEP, MFLE Y EWF las predominantes en el trabajo de R. R. Machado-García, et al. [1], no se encontraron muchos métodos computacionales para el análisis de fractura en polímeros en los artículos y libros consultados, siendo estas técnicas un posible campo de estudio a desarrollar.

5. Conclusiones

El estudio de polímeros es de gran relevancia hoy en día debido a que estos materiales se encuentran en muchas herramientas, aparatos y de más objetos de uso cotidiano e industrial que requieren de un estudio para mejor sus propiedades y aprovechamiento durante el uso, es cierto que los materiales poliméricos no suelen estar solos sino compuestos para usos que requieran propiedades como altas resistencias, pero entender los conceptos básicos es esencial para desarrollar nuevas teorías y métodos de análisis en diferentes ramas de la mecánica de materiales.

Como se mencionó en el apartado de resultados, los métodos computacionales son un campo que se puede seguir desarrollando para mejorar el análisis de fractura en polímeros sin necesidad de realizar pruebas destructivas todo el tiempo o incluso sin necesidad de fabricar la pieza deseada para efectuar dichas pruebas, esto siempre resulta atractivo para las empresas porque representa un ahorro en la fabricación de probetas, aunque comparado con materiales metálicos la fabricación de probetas poliméricas es mucho más económica.

Los estudios que surjan en materia de fractura en materiales poliméricos beneficiara a todas las industrias que utilicen elementos hechos de algún polímero en sus máquinas, procesos o cualquier otro sistemas como por ejemplo las tuberías de transporte de fluidos, este sector de fabricación de tuberías de plástico se puede ver beneficiada ya que sus productos son más económicos que los tubos de materiales metálicos, y si se logra entender con mayor precisión los mecanismos de fractura en polímeros, se logrará mejorar sus propiedades y estos materiales podrían reemplazar en algún punto las tuberías metálicas usadas en industrias como la petrolera o de abastecimiento de agua potable.

Bibliografía

[1] R. R. Machado-García, M. González, & J. González. (2019). “Estado del arte sobre la mecánica de fractura en tuberías de polietilenos de alta densidad (PEAD).” *Vol. 18, Núm. 4, Ago.*

[2] Albañil, H. H., & Édgar Espejo Mora. (2002). *Mecánica de Fractura y Análisis de Falla*. Univ. Nacional de Colombia.

[3] Ortiz Mascote, T., & Osornio Correa, C. (1993). *Análisis de mecánica de la fractura bajo fatiga.*

[4] Arana Bilbao, J. L., & Javier Jesús González Martínez. (2002). *Mecánica de fractura*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatearen Argitalpen Zerbitzua.

[5] V. Pettarin, P. M. Frontini, & G. E. Eliçabe. (2005). *Optimal ligament lengths in impact fracture toughness estimation by the essential work of fracture method* (Polym. Test, Vol. 24).