Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 0 No. 0 (2023) 1-7

Evaluación de G_{IC} en fibra de vidrio/epóxica usando emisión acústica
Evaluation of G_{IC} in glass fiber/epoxy using acoustic emission

M. P. de Urquijo-Ventura[a, *], C. Rubio-González[b], J. A. Rodríguez-González[a]

[a] *Dirección de Tecnologías Estratégicas y Posgrado, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Av. Pie de la Cuesta #702, Col. Desarrollo San Pablo, C.P. 76125, Querétaro, Qro., México.*
[b] *Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Epigmenio González 500 Fracc. San Pablo, Querétaro, C.P. 76130, México.*

Resumen

El uso de los materiales compuestos laminados de fibras de vidrio/epóxica ha aumentado en los últimos años debido a sus elevadas propiedades de sinergia logradas. Sin embargo, estos materiales tienden a sufrir delaminación lo cual puede propiciar fallas catastróficas en componentes estructurales como los álabes de turbinas eólicas, hélices de helicópteros o fuselajes de avión. Con esta motivación, en este trabajo se presenta una manera innovadora de evaluar el inicio y propagación de la delaminación en modo I por medio de dos Sensores de Emisión Acústica (SEA) que pueden monitorear simultáneamente y en tiempo real la delaminación de especímenes de fibras de vidrio/epóxica ensayadas de acuerdo con la norma ASTM D5528. Las posiciones de los SEA en la probeta son: SEA10 y SEA75 localizados a 10 y 75 mm antes y después del inicio de la grieta, respectivamente. Los resultados de la medición de la delaminación modo I mediante EA estuvieron en concordancia con los resultados obtenidos por los métodos de la norma ASTM; siendo el SEA10 el que mostró una mayor precisión en la detección de la delaminación.

Palabras Clave: Compuestos de fibra de vidrio/epóxica, tenacidad a la fractura interlaminar modo I, emisión acústica, delaminación.

Abstract

The use of glass fiber/epoxy composites has increased in recent years due to their highly achieved synergistic properties. However, these materials tend to delaminate which can lead to catastrophic failure of structural components such as wind turbine blades, helicopter propellers or aircraft fuselages. With this motivation, this paper presents an innovative way to evaluate the initiation and propagation of mode I delamination by means of two Acoustic Emission Sensors (AES) that simultaneously and in real time monitored the delamination of glass fiber/epoxy composite specimens, which were tested in accordance with ASTM D5528 standard. The positions of the AES in the specimen are: AES10 and AES75 located at 10 and 75 mm before and after the delamination. The results of the measurement of mode I delamination by AE agreed with the results obtained by the standard methods; being the AES10 the one that showed the highest precision in the detection of delamination.

Keywords: Glass fiber/epoxy composites, mode I interlaminar fracture toughness, acoustic emission, delamination.

1. Introducción

En las últimas décadas, los materiales compuestos laminados (MCL) han sido utilizados en una gran variedad de aplicaciones debido a sus excelentes propiedades mecánicas y físicas. Algunos ejemplos de sus aplicaciones se encuentran en la industria naval, aeronáutica, automotriz, armamentista y de energía con la fabricación de álabes de turbinas eólicas. (Saeedifar & et al, 5, 2020). Esta amplia gama de aplicaciones no solo se debe a sus excelentes propiedades mecánicas sino también a su costo-beneficio (Salimi Mofrad & et al, 2023) (Saeedifar & et al, 5, 2020). Sin embargo, uno de los principales problemas que presentan estos materiales es la falla por delaminación, debido a su tendencia inherente a que las capas se separen cuando se aplican cargas mecánicas fuera del plano del laminado. Entre los tres modos puros de fractura, la delaminación en modo I es la más común para los MCL, por lo que la caracterización de esta delaminación es de suma importancia en el diseño de componentes estructurales fabricados de MCL. (Saeedifar & et al, 2, 2015b) (Mohammadi & et al, 2021)

Una de las herramientas más innovadoras en la caracterización de la delaminación de los MCL ha sido la técnica de emisión acústica (EA), debido a que no es invasiva y puedo llevarse a cabo en tiempo real, la cual provee la capacidad de monitorear

*Autor para la correspondencia: m.urquijo@posgrado.cidesi.edu.mx
Correo electrónico: m.urquijo@posgrado.cidesi.edu.mx (María del Pilar Urquijo-Ventura), crubiog@tec.mx (Carlos Rubio-González), julio.rodriguez@cidesi.edu.mx (Julio Alejandro Rodríguez-González)

Historial del manuscrito: recibido el 28/04/2023, última versión-revisada recibida el 22/09/2023, aceptado el 19/09/2023, en línea (postprint) desde el 16/10/2023, publicado el DD/MM/AAAA. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11048

El DOI puede ser empleado para citar este manuscrito, pero será habilitado hasta la publicación en Pädi.

Aceptado/Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

la delaminación desde el inicio y su posterior evolución. (Saeedifar & et al, 5, 2020)

Diversos trabajos reportan la aplicación de la técnica de EA para detectar la posición de la punta de la grieta en tiempo real en MCL de fibra de vidrio/epóxica. Por ejemplo, (Saeedifar & et al, 2, 2015b) que utilizaron un análisis de elemento finito y la técnica de EA para investigar el crecimiento de la grieta, con lo que obtuvo una buena capacidad de detección tanto en EA como con el modelo de elemento finito. También (Saeedifar & et al, 3, 2016) realizaron estudios para detectar el inicio de la grieta usando el parámetro de las cuentas acumuladas de la señal acústica, la energía acústica acumulada y los métodos que establece la norma ASTM. Los autores encontraron que los parámetros de EA tienen una muy buena relación con los resultados calculados con la norma ASTM. (Nikbakht & et al, 2017) investigaron el inicio y evolución de grieta para diferentes mecanismos de daño en la prueba DCB para MCL con fibras orientadas a diferentes direcciones en la región interfacial. Las técnicas utilizadas por estos autores fueron de EA y métodos de imágenes microscópicas. Sus resultados mostraron que tanto la curva carga-desplazamiento y los datos de EA se relacionaron satisfactoriamente con los resultados microscópicos de inicio y evolución del daño. (Saeedifar & et al, 4, 2017) investigaron el inicio y evolución de daño en MCL, por medio de EA y la implementación de modelo de zonas cohesivas mediante elemento finito. Los autores encontraron que la técnica de EA es muy adecuada para detectar el inicio de la grieta por delaminación en concordancia con los resultados de elemento finito. (Saeedifar & et al, 1, 2015a) realizaron un trabajo experimental para investigar los mecanismos de fallo de delaminación modos I y II usando la técnica de EA. (Samborski & et al, 2019) analizaron la delaminación en laminados de fibra de vidrio mediante la técnica de EA con tratamiento de datos con transformada de Fourier y métodos descritos en la norma ASTM D5528 para determinar la tenacidad a la fractura interlaminar.

Para delaminación en MCL de fibra de vidrio, se tiene autores como: (Gholizadeh & et al, 1, 2018) quienes utilizaron fibras electro hiladas para aumentar la tenacidad a la fractura interlaminar, y para comprobar el efecto de las fibras electro hiladas, realizaron ensayos de modo I y II de delaminación, usando la técnica de emisión acústica, la cual pudo detectar una menor cantidad de daño en las laminados modificados, lo cual coincide, ya que estos aumentaron su tenacidad a la fractura interlaminar. (Gholizadeh & et al, 2, 2021) utilizaron la técnica de EA para determinar la influencia de agregar nanofibras de policaprolactona en el modo de fallo I y II, los resultados mostraron un aumento en la tenacidad a la fractura interlaminar de la muestra con nanofibras. (Cheng & et al, 2023) agregaron nanotubos de carbono (NTC) al MCL para aumentar la tenacidad a la fractura interlaminar y utilizaron la técnica de EA para analizar los mecanismos de endurecimiento y daño, los resultados mostraron que los NTC aumentaron la tenacidad a la fractura interlaminar del laminado unidireccional (UD).

La técnica de EA también ha sido aplicada para caracterizar la delaminación en materiales híbridos, como en el trabajo de (Saidane & et al, 2019) donde usaron laminados a base de fibras de vidrio y de lino que se estudiaron con el ensayo DCB. Los autores reportan la correlación de los mecanismos de daño con las mediciones de EA durante el ensayo y las imágenes del microscopio electrónico de barrido (MEB), encontrando que los laminados híbridos requieren mayor energía para el inicio y propagación de la grieta interlaminar.

Los trabajos antes mencionados utilizan ampliamente la técnica de EA, pero estos autores no mencionan la influencia de la posición de los sensores de EA en la muestra DCB, o cómo es la medición con base a la distancia que tienen con respecto a la punta de la grieta. Por lo anterior en este trabajo se comparan los resultados de la detección del inicio de delaminación por emisión acústica en función de la posición de los sensores de EA, en muestras de MCL a base de resina epóxica reforzada de fibras de vidrio UD. Los resultados obtenidos por EA fueron comparados con los resultados de los métodos establecidos por la norma ASTM D5528. Finalmente, la superficie de fractura del MCL ensayado por DCB fue evaluado mediante análisis por el MEB.

2. Materiales y proceso experimental

2.1. Materiales

Se utilizó resina Epolam 2040 y Endurecedor Epolam 2047, como refuerzo se usó fibras de vidrio UD 100 g/m^2. Para alcanzar la temperatura de 55°C se utilizó la Plancha Corning PC-620D, un termómetro infrarrojo para monitorear la temperatura y una bomba de vacío. Para los ensayos mecánicos se utilizó una Máquina universal Shimadzu 100 kN y el instrumento de Emisión Acústica fue un Micro Structural Health Monitoring (SHM) de Physical Acoustics.

2.2. Proceso de infusión asistido por vacío

El proceso de manufactura se realizó mediante la técnica de infusión de resina asistida por vacío.

2.2.1. Preparación y apilado de las fibras

En la Figura 1 se muestra un esquema del corte de las fibras, en el cual las fibras secas son cortadas del rollo en hojas de 22 cm x 22 cm, luego se apilan y se les coloca una lámina fina de teflón (13 µm) en medio del apilado.

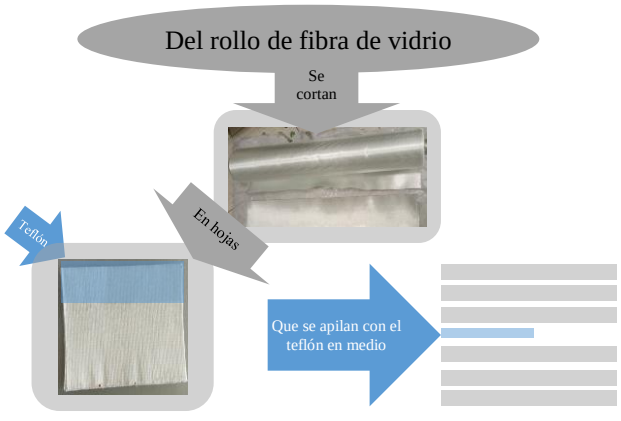

Figura 1: Esquema del corte de fibras de vidrio unidireccional y del apilamiento de las capas de fibra de vidrio y el teflón.

Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

2.2.2. Preparación de la bolsa de vacío

Posteriormente, el apilado se colocó en una placa limpia de acero inoxidable, Figura 2 a), a la que posteriormente se le pegó cinta doble cara de butilo, Figura 2 b). Después se colocó el tubo de espiral, el cual, permite una mejor distribución de la resina, Figura 2 c). Encima de las fibras se colocó tela antiadherente y malla de distribución, Figura 2 c). Posteriormente se pegaron los tubos de entrada y salida Figura 2 d). Por último, se cerró la bolsa como se ve en la Figura 2 d).

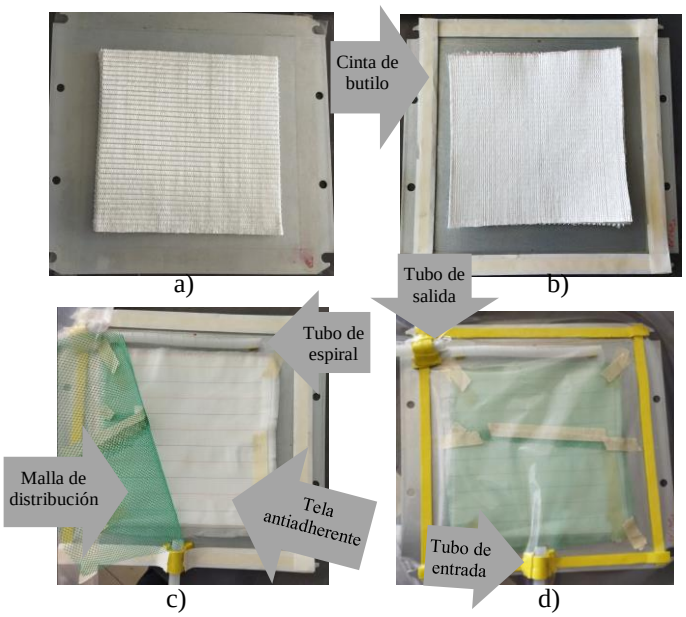

Figura 2: a) placa de acero inoxidable y apilados de fibra de vidrio, b) cinta de butilo, c) tubo de espiral, tela antiadherente y malla de distribución, d) tubo de salida y entrada.

2.2.3. Infusión y curado de resina

A continuación, se coloca la placa en la plancha de calentamiento a una temperatura controlada de 55 °C. El tubo de salida se conecta a la trampa de resina, y la trampa de resina se conecta a la bomba de vacío, después el tubo de entrada se cierra con una prensa y una pinza de presión, Figura 3.

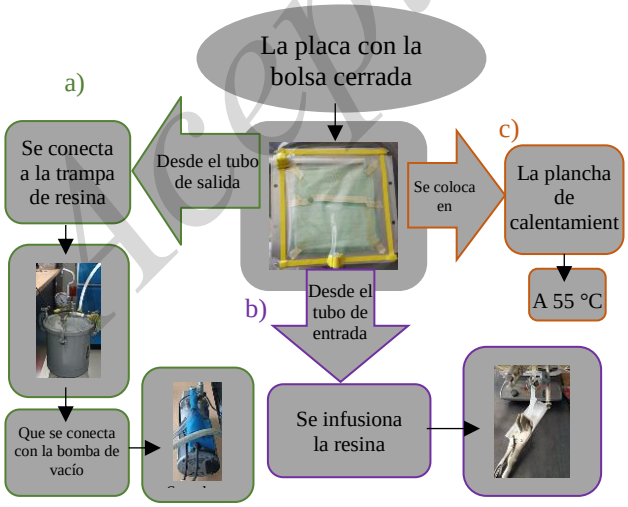

Figura 3: Esquema del proceso de infusión de resina, a) sistema de vacío, b) entrada de resina, y c) sistema de calentamiento.

Se enciende la bomba y cuando el sistema llega a 80 kPa de vacío se realiza la infusión de la resina epóxica previamente preparada mezclando la resina Epolam 2040 con el endurecedor a una relación de 100:30. Después de 4 horas con la temperatura y presión constante, se apaga la plancha y se deja solidificar la resina a temperatura ambiente durante 24 horas.

2.3. Ensayo DCB e instrumentación de la técnica de emisión acústica

Los laminados se cortaron en especímenes tipo doble viga en voladizo (DCB, por sus siglas en inglés) con respecto a la norma ASTM D5528. Las dimensiones de la muestra fueron 25 mm de ancho, 4 mm de espesor y 50 mm de longitud de grieta inicial (a_0), el cual es una distancia que se mide desde el punto de aplicación de la carga al final del inserto de teflón donde posteriormente se pegaron las bisagras en el extremo del espécimen DCB usando adhesivo epoxi grado estructural. véase la Figura 4.

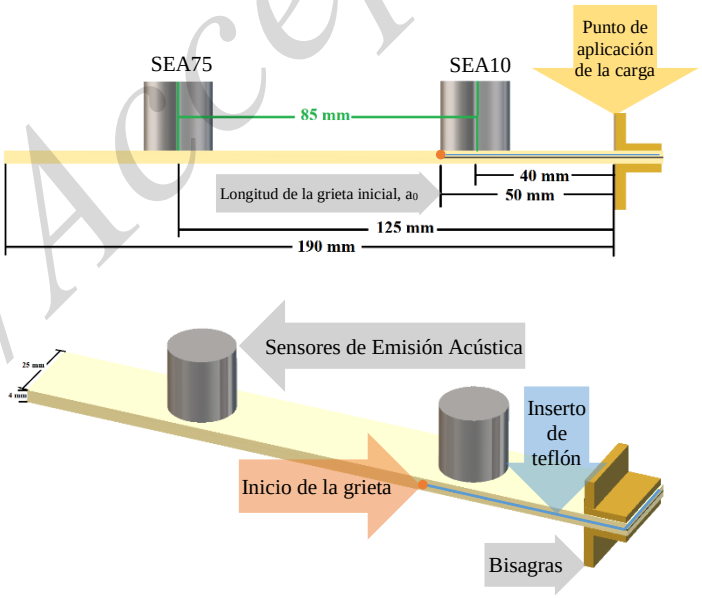

Figura 4: Dimensiones de la probeta DCB y posición de los Sensores de Emisión Acústica (SEA).

Para poder monitorear la grieta visualmente se pintó el borde de la muestra con corrector blanco (como se muestra en la Figura 5, marcando una línea donde termina el inserto de teflón, que es donde inicia la grieta, luego otras 5 líneas verticales cada 1 mm, después cada 5 mm hasta llegar a 50 mm de longitud.

Figura 5: Muestra DCB montada para el ensayo de fractura con instrumentación de los sensores de Emisión Acústica (SEA75 y SEA10).

Aceptado/Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

A continuación, se procedió a instrumentar las muestras colocando los sensores de emisión acústica (SEA), los cuales fueron acoplados con una ligera capa de vaselina y fijados con cinta de butilo, como se ve en la Figura 5. Los SEA estuvieron a 40 mm y a 125 mm de la línea de aplicación de la carga y a 10 mm y 75 mm, con relación a la punta de la grieta, véase Figura 4, los SEA fueron identificados como SEA10 y SEA75 respectivamente. De este modo los dos sensores tuvieron una separación de 85 mm como se observa en la Figura 4.

Se ensayaron tres muestras para tener un promedio de los resultados de tenacidad a la fractura interlaminar modo I (G_{IC}), la cual, según el modelo de teoría de viga modificada de la norma (ASTM, 2007) queda expresada como:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \qquad (1)$$

Donde:
P es la carga aplicada, para G_{IC} es la carga crítica cuando comienza la delaminación.
δ es el desplazamiento del cabezal en P correspondiente.
b es el ancho del espécimen.
a es la longitud de la delaminación, en el caso de G_{IC} es a_0, y
Δ es el factor para corregir la rotación de brazo del espécimen DCB en el frente de la delaminación, el cual se calcula obteniendo el valor de la intersección de la recta $C^{1/3}$ vs a al eje de delaminación y donde C es la "complianza".

La norma menciona también tres procedimientos para determinar el inicio de la grieta (que corresponden a los valores (δ,P) necesarios para calcular G_{IC}) los cuales son: 1) el punto donde la curva carga-desplazamiento empieza a ser no lineal (NL), 2) el punto donde inicia la grieta visualmente (VIS), 3) el punto de intersección de una recta con una pendiente 5% menor a la pendiente de la curva carga-desplazamiento (ASTM, 2007). Para el caso de Emisión Acústica (EA), valores (δ,P) fueron determinados considerando el cambio de la energía absoluta acumulativa (EAA) registrada durante el ensayo en cada uno de los sensores colocados en el espécimen DCB.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de superficie de fractura

En la Figura 6a se ilustra la delaminación observada en el ensayo DCB de la muestra número 1 de material compuesto laminado (MCL) a base de resina epóxica reforzada con fibras de vidrio. Haciendo un acercamiento de la imagen se puede ver claramente los puentes de fibra que se forman conforme se delamina la probeta DCB, Figura 6 b. Para su análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB) se separaron los brazos de la muestra y se depositó una ligera capa de oro en la superficie de fractura señalada por la flecha amarilla en la Figura 5 a.

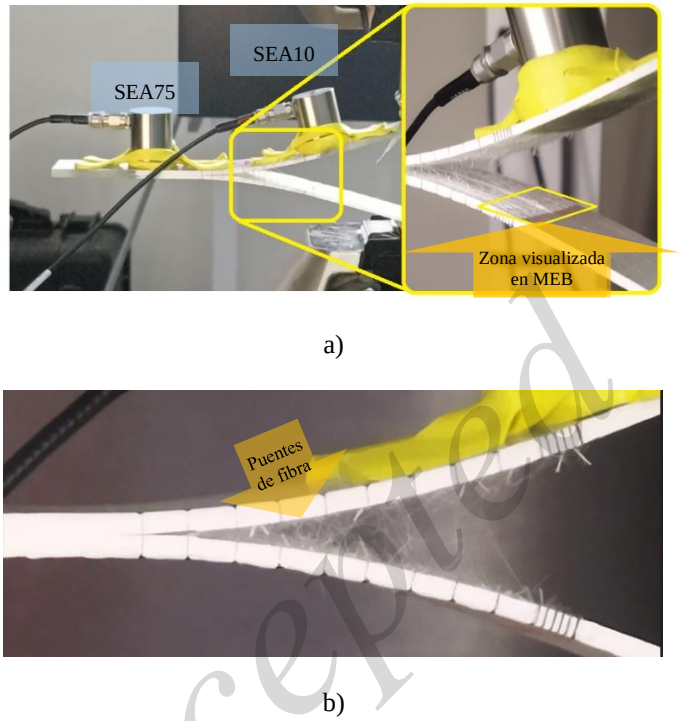

Figura 6: a) Espécimen DCB durante el ensayo de fractura y b) acercamiento donde se observan los puentes de fibras.

En la Figura 7 se muestra la superficie de delaminación del espécimen 1 de DCB de MCL. La flecha 1) indica la zona perteneciente a la grieta inicial, es decir, donde antes del ensayo estuvo el inserto de teflón, aquí se observa una superficie de fractura lisa. El inicio de la grieta se encuentra justo donde comienza la zona delaminada, véase flecha 2). En la zona de delaminación se pueden observar algunos mecanismos de daño como: 3) puentes de fibras, los cuales se visualizan como fibras en distintas posiciones y desprendidas de la matriz. Este mecanismo pudo ser claramente visualizado de forma macroscópica durante el ensayo DCB (Figura 6) y confirmado usando el MEB (Figura 7). Asimismo, se observaron 4) impresiones de fibra, las cuales representan huellas en forma cilíndrica debido a la separación de las fibras de la matriz.

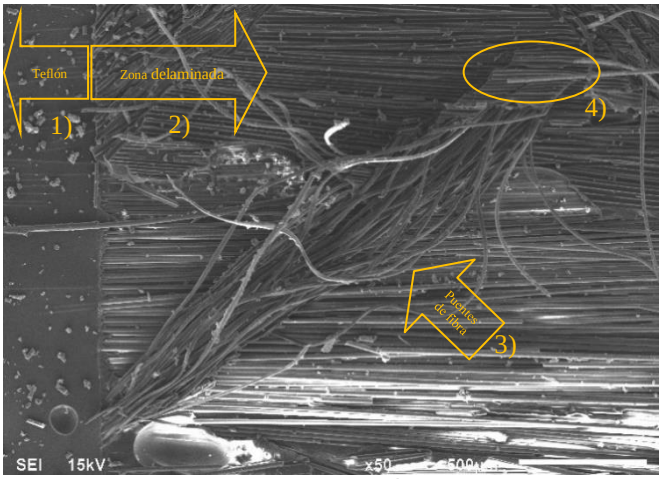

Figura 7: Imagen tomada del MEB a x50 del límite donde estada el inserto de teflón y la zona de delaminación.

Aceptado/Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

3.2. Detección y monitoreo del inicio y crecimiento de la grieta

La influencia de los puentes de fibras en las propiedades mecánicas se puede evidenciar en la gráfica de G_{IC} y Pc con respecto al crecimiento de la grieta (Figura 8). Esta figura muestra que G_{IC_ini} es menor a G_{IC_prop}, es decir la tenacidad a la fractura interlaminar modo I aumenta a medida que el valor de la delaminación crece, lo que significa que se necesita mayor energía de deformación para que la delaminación a partir del inicio de la grieta propague, esto puede ser completamente atribuido al fenómeno de los puentes de fibras como se observó en el análisis de la fractura (Figura 6 y 7). (Hu & et al, 2021)

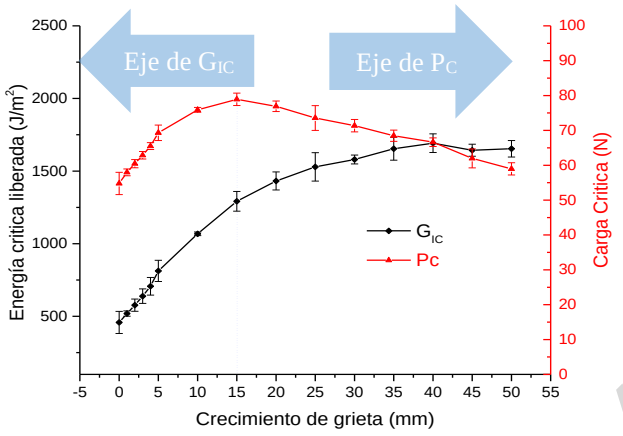

Figura 8: Curva de energía critica liberada (G_{IC}) y carga critica (Pc) con respecto al crecimiento de la grieta.

Lo anterior es también observado por la gráfica de Pc vs crecimiento de grieta, ya que presenta un comportamiento similar a G_{IC}, es decir, la carga crítica aumenta después del inicio del crecimiento de grieta. Sin embargo, es importante mencionar que a partir de 20 mm de delaminación la carga crítica comienza ligeramente a disminuir con respecto al valor máximo (Pc=78.9 N), pero la energía liberada continúa aumentando hasta alcanzar un valor constante en Δa=40 mm, debido muy probablemente a una reducción de los puentes de fibras.

3.3. Determinación de la tenacidad a la fractura interlaminar, con emisión acústica

En la Figura 9 se presentan los resultados de carga-desplazamiento obtenido del ensayo DCB para los laminados fabricados. Ésta gráfica presenta una zona lineal elástica antes de la delaminación y una región no lineal justo cuando empezó el inicio de la delaminación. Este punto de no linealidad (NL) en la curva tiene valores de desplazamiento igual a 6.8 mm y de carga de 46.6 N, a partir del punto NL la pendiente de la curva disminuye gradualmente, esta etapa se asocia con la propagación de la grieta y el aumento de la carga se relaciona con los puentes de fibras y propagación de la grieta. El cambio de pendiente continua hasta la carga máxima (a 20.8 mm en el eje *x* y 81.1 N en el eje *y*), para después continuar con una tendencia decreciente. (Wan & et al, 2020) (ASTM, 2007)

Para la técnica de EA se reporta la curva de EAA vs desplazamiento, que es la energía acústica que libera el material al ser sometido a esfuerzos mecánicos, véase la Figura 9 (eje vertical rojo SEA10 y eje vertical verde SEA75). En la zona lineal de la curva carga-desplazamiento, la EAA de los dos sensores presentan valores relativamente pequeños de tal manera que no son apreciables en la gráfica, estos valores bajos de liberación de energía pueden ser atribuidos a los esfuerzos de flexión que sufren los brazos de la muestra cuando se empieza el desplazamiento del cabezal, lo cual se justifica ya que el proceso de delaminación no ha comenzado. Después del punto NL el SEA10 detectó un crecimiento de la EAA a partir de los 8.5 mm, en el SEA75 el aumento de EAA se presenta a los 11 mm, esta diferencia puede ser debida a la posición de los sensores, ya que SEA10 se localizó antes de la grieta, por lo que cuando empezó la delaminación, el brazo en el que estaba se separó del de abajo (vea Figura 6), por lo que la sección transversal se redujo a la mitad, esto disminuyó la energía acústica que podía emitir, por lo que la EAA en este sensor es menor (SEA10= 1.19484×10^{7}aJ) con respecto al sensor más alejado de la punta de la grieta (SEA75= 1.3923×10^{9}aJ), y ya que el SEA75 fue posicionado a 25 mm después de donde terminó la grieta, mantuvo la misma sección transversal (véase la Figura 6), por lo que fue capaz de recopilar información acústica a una magnitud de energía mayor, pero esto dificultó la visualización del comportamiento desde el punto NL y hasta los 11 mm de señales relativamente pequeñas.

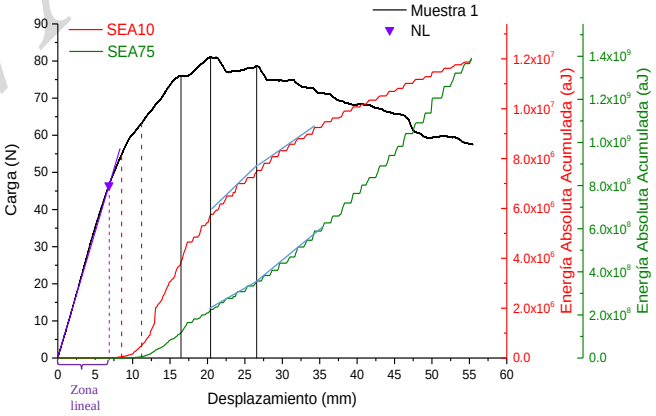

Figura 9: Curva carga-desplazamiento y energía absoluta acumulada del SEA10 (eje vertical rojo) y SEA75 (eje vertical verde).

El incremento de EAA que comenzó en 8.5 mm para SEA10 y en 11 mm para SEA75 continuó para los dos sensores hasta aproximadamente 16.4 mm, lo cual coincide con el aumento de la carga a 75.9 N. El siguiente cambio de pendiente en los sensores fue desde 16.4 mm hasta 20.4 mm que es el desplazamiento de la carga máxima de 81.1 N, después la pendiente volvió a aumentar de 20.4 mm a 26.6 mm donde P es 78.6N el cual representa otro aumento de la carga, Figura 9. Estos incrementos de la carga en (16.4 mm de δ, 75.9 N de P), (20.4 mm de δ, 81.1N de P) y (26.6 mm de δ, 78.6 N de P) son asociados con los mecanismos de puentes de fibras, ya que estos mecanismos provocan una resistencia en la propagación de grieta, aumentando significativamente la resistencia a la delaminación, (Liu & et al, 2021) esto parece implicar que los dos sensores fueron capaces de detectar los efectos de estos

Aceptado/Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

mecanismos. Por último, se tiene que después del punto (26.6 mm de δ, 78.6 N de P, Figura 9) la curva de SEA10 mantuvo un comportamiento monotónico, al contrario del comportamiento que presentó el SEA75, el cual fue exponencial, lo cual se puede deber a la influencia de los brazos y la posición de los sensores.

En la detección del inicio de la grieta, según la norma, el método que típicamente se presenta primero es el NL, seguida por el obtenido mediante el procedimiento visual (VIS), en los ensayos que se realizaron en este trabajo todos siguieron esta tendencia, por ejemplo, en la Figura 10, se puede ver que para NL el punto es (6.8mm de δ,46.5N de P) y para el VIS (8.0 mm de δ, 52.4N de P) lo que significa que el punto VIS es 17% mayor con respecto al desplazamiento y 13% mayor en relación a la carga que el punto NL.

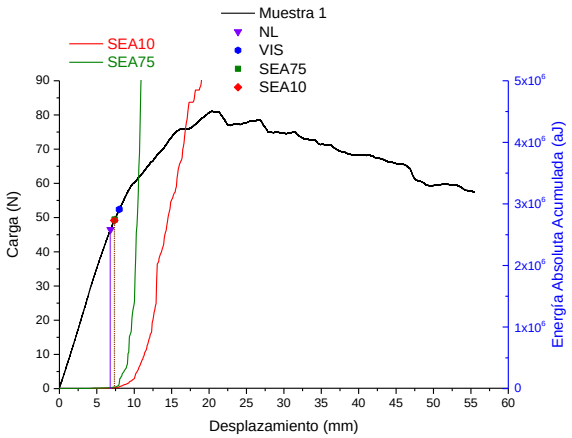

Figura 10: Curvas carga-desplazamiento (eje izquierdo) con las técnicas: NL, VIS, SEA10 (rojo) y SEA75 (verde) y EAA-desplazamiento (eje derecho).

Para determinar el inicio de la grieta con la técnica de EA se graficó las dos curvas con la misma escala, de tal manera que no afecte el hecho de que el SEA75 tiene una magnitud de EAA mayor, además se ajustó la escala para que fuera posible visualizar los detallas de las curvas después del punto lineal (Figura 10 eje vertical azul curva SEA10 y SEA75), por lo que, cuando los sensores detectan un aumento significativo (abrupto) de la EAA se puede atribuir al inicio y propagación de la delaminación (Saidane & et al, 2019) (Saeedifar & et al, 1, 2015a). A una escala menor, también se presentan cambios de EAA (de menor energía), los cuales pueden ser atribuidos a la flexión que presentan los brazos de DCB antes de la delaminación. Los puntos determinados con EA resultaron ser similares, SEA10 a (7.3 mm de δ, 49.2 N de P) y SEA75 a (7.4 mm de δ, 49.4 N de P) lo cual corresponde a (7% de δ, 6% de P) y (8% de δ, 6% de P) más del punto NL respectivamente.

En la Figura 11 se presentan los resultados del promedio y desviación estándar de G_{IC} de las tres muestras ensayadas para cada técnica de detección de delaminación modo I, donde la G_{IC} obtenida por el SEA10 y el SEA75 son 21 y 23% más grandes que la G_{IC} obtenida por la norma para el caso del procedimiento NL, pero no supera los resultados de VIS. Además, al comparar las desviaciones estándar, del método NL con los de los EA, se encuentra que los resultados de SEA10 y SEA75 están dentro del rango de la desviación estándar de NL.

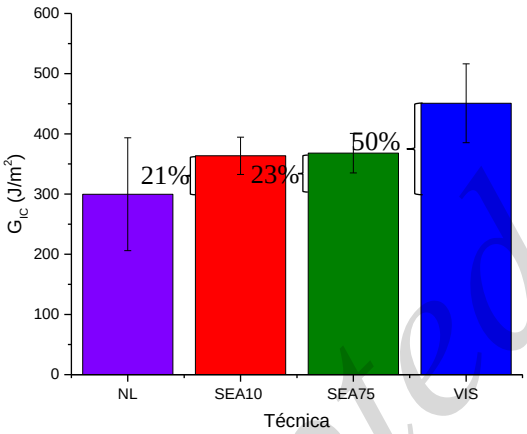

Figura 11: Tenacidad a la fractura interlaminar de inicio determinada por las diferentes técnicas.

Con respecto a los resultados del promedio y desviación estándar de G_{IC} de las tres muestras, los resultados de EA, en donde SEA10 es 21% y SEA75 23% mayor al método NL, se tiene que la diferencia entre los dos sensores es de un 2%, lo cual es considerablemente menor a la diferencia que presentaron los promedios de los métodos de la norma, ya que, el método VIS presenta un promedio que es 50% mayor que el de NL.

4. Conclusiones

Al comparar la capacidad de detección del inicio de la grieta, usando la técnica de emisión acústica (EA) en función de la posición de los sensores en la muestra de doble viga en voladizo (DCB), se concluyó que la posición de los sensores no influye en su capacidad para detectar la delaminación, esto porque los resultados de ambos sensores de EA fueron validados con los de la norma, al encontrarse dentro del rango de la desviación estándar del método NL y al no superar los valores del VIS.

Por medio de la comparación del promedio de los resultados de las técnicas usadas para determinar G_{IC} en las 3 muestra, se concluyó que no hay una diferencia significativa entre los resultados de SEA10 y SEA75, solo presentan el 2%.

A pesar de que SEA10 y SEA75 detectan una G_{IC} similar, el comportamiento de sus curvas de EAA después de 26.6 mm es diferente, esto es debido a la influencia de los brazos del espécimen y la posición de los sensores, ya que el SEA10 disminuye su sección transversal a la mitad cuando los brazos de la muestra se separan, resultando comportamientos diferentes de las curvas.

En la curva de G_C vs delaminación se encontró que la G_{IC_prop} es mayor que la G_{IC_ini} debido a los puentes de fibras como lo muestra el análisis de microscopía electrónica de barrido. De igual modo, en la curva carga-desplazamiento los incrementos de P, que son principalmente asociados a los puentes de fibras, fueron detectados por los dos sensores de EA.

Aceptado/Accepted

Este manuscrito ha sido aceptado después de una revisión a doble-ciego por pares y será publicado en una futura edición de esta revista. Su contenido es definitivo y únicamente cambiará en la versión final la información relativa al volumen, número, fecha de publicación y paginado.

5. Abreviaciones y Acrónimos

EA: Emisión Acústica
Materiales compuestos laminados: MCL
DCB: Ensayo de doble viga en voladizo, por sus siglas en inglés
EA: emisión acústica
SEA: sensores de emisión acústica
SEA10: sensores de emisión acústica localizado a 10 mm antes de la punta de la grieta.
SEA75: sensores de emisión acústica localizado a 75 mm después de la punta de la grieta.
UD: Unidireccional
MEB: Microscopio electrónico de barrido
SHM: Micro Structural Health Monitoring
a_0: longitud de grieta inicial
G_I: Tasa de liberación de energía en modo I
G_{IC}: Tasa crítica de liberación de energía en modo I o tenacidad a la fractura interlaminar modo I.
G_{IC_ini}: G_{IC} inicial
G_{IC_prop}: G_{IC} de propagación
P_C: Carga crítica
NL: Punto de no linealidad establecido por la norma
VIS: Punto de método visual establecido por la norma
EAA: Parámetro de la técnica de EA, energía acumulada absoluta

Agradecimientos

Agradecemos al Ing. Marco Paredes, Ing. José Alberto Gallardo, M.C. Antonio Banderas, Dr. Eduardo Trujillo y al M.C. Edgar Miranda por su apoyo técnico brindado en este trabajo. Asimismo, agradecemos al Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-O) por el apoyo económico del proyecto y al CONAHCYT por el apoyo de una Beca Nacional para los estudios de Maestría del Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PICYT) del CIDESI de la Ing. María Pilar de Urquijo Ventura.

Referencias

ASTM. (2007). Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, 19428-2959.

Cheng, X., & et al. (2023). Mode I interlaminar fracture characteristics of CNTs doped woven and unidirectional CFRP via acoustic emission. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 103812. doi:https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103812

Gholizadeh, A., & et al. (2018). Considering damage during fracture tests on nanomodified laminates using the acoustic emission method. European Journal of Mechanics - A/Solids, 452-463. doi:https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.06.011

Gholizadeh, A., & et al. (2021). Applying Acoustic Emission Technique for Detecting Various Damages Occurred in PCL Nanomodified Composite Laminates. Polymers, 3680. doi:https://doi.org/10.3390/polym13213680

Hu, P., & et al. (2021). Influence of curing processes on the development of fiber bridging during delamination in composite laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 106564.

Liu, W., & et al. (2021). Theoretical analysis and experimental investigation of the occurrence of fiber bridging in unidirectional laminates under Mode I loading. Composite Structures, 113383.

Mohammadi, R., & et al. (2021). The effect of mode II fatigue crack growth rate on the fractographic features of CFRP composite laminates: An acoustic emission and scanning electron microscopy analysis. Engineering Fracture Mechanics, 107408.

Nikbakht , M., & et al. (2017). Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization. Composites Part B: Engineering, 185-196. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.047

Saeedifar , M., & et al. (2016). Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission. Composites Part B: Engineering, 113-122. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.037

Saeedifar, M., & et al. (2015a). Interlaminar Fracture Toughness Evaluation in Glass/Epoxy Composites Using Acoustic Emission and Finite Element Methods. JMEPEG, 373-384. doi:DOI: 10.1007/s11665-014-1291-2

Saeedifar, M., & et al. (2015b). Prediction of delamination growth in laminated composites using acoustic emission and Cohesive Zone Modeling techniques. Composite Structures, 120-127. doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.003

Saeedifar, M., & et al. (2017). Delamination analysis in composite laminates by means of Acoustic Emission and bi-linear/tri-linear Cohesive Zone Modeling. Estructuras compuestas, 161, 505-512. doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.020

Saeedifar, M., & et al. (2020). Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review. Composites Part B: Engineering, 108039.

Saidane, E. H., & et al. (2019). Mode-I interlaminar fracture toughness of flax, glass and hybrid flax-glass fibre woven composites: Failure mechanism evaluation using acoustic emission analysis. Polymer Testing, 246-253. doi:https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.022

Salimi Mofrad, H., & et al. (2023). Efecto del espesor de la estera nanofibrosa PA66 electrohilada en la tenacidad a la fractura en modo II mediante emisión acústica (AE) con técnica de agrupación de datos. Mecánica de Fractura Teórica y Aplicada, 103788.

Samborski , S., & et al. (2019). Mode I Interlaminar Fracture of Glass/Epoxy Unidirectional Laminates. Part I: Experimental Studies. Materials, 1607. doi:https://doi.org/10.3390/ma12101607

Wan, Y., & et al. (2020). Mode I interlaminar crack length prediction by the resistance signal of the integrated MWCNT sensor in WGF/epoxy composites during DCB test. J Mater Res Technol, 5922-5933. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.119

Aceptado / Accepted

El DOI puede ser empleado para citar este manuscrito, pero será habilitado hasta la publicación en Pädi.