

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato “**

**Caracterización de laminados de materiales
compuestos a través de ensayos mecánicos y
emisión acústica (*)**

por Ing. Lucas Omerzu

Director

Dr. Martín Pedro Gómez

Codirector

Esp. Ing. Aníbal Adrián Rodríguez

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2018

PRESENTACIONES EN CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS

- *“Estudio de la emisión acústica en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono”*, Lucas A. Omerzu, Aníbal A. Rodríguez Y Martín Pedro Gómez, Jornadas de Acústica, Audio y Sonido (JAAS), UNTREF, 17 y 18 de agosto de 2017, Caseros, Buenos Aires, Argentina.
- *“Caracterización de laminados de materiales compuestos a través de ensayos mecánicos y emisión acústica”*, Lucas Omerzu, Aníbal Rodríguez, Martín P. Gómez, XI Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales (CORENDE), 04 al 06 de octubre de 2017, Museo Nacional de Bellas Artes, Neuquén, Argentina.
- *“Aplicación de la emisión acústica para el estudio de materiales CFRP laminados sometidos a flexión”*, Omerzu Cadorini L. A., Rodríguez A., Gómez M.P., 9° Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (E-GLEA 9) 29-31 de agosto de 2017 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.
- *“Caracterización de Laminados de Materiales Compuestos a través de Ensayos Mecánicos y Emisión Acústica”*, L. Omerzu, A. Rodríguez, M. Gómez, 17° Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales CONAMET-SAM, 18-20 de octubre de 2017, Copiapó, Chile.

TRABAJOS PUBLICADOS EN ACTAS DE CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS

- Omerzu Cadorini, L. A., Rodríguez A., Gómez M.P., *“Aplicación de la emisión acústica para el estudio de materiales CFRP laminados sometidos a flexión”*, Actas del 9° Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (E-GLEA 9) en edición, CNEA, (2018) ISBN en trámite.
- Lucas Omerzu, Aníbal Rodríguez, Martín P. Gómez, *“Caracterización de laminados de materiales compuestos a través de ensayos mecánicos y emisión acústica”*, Actas del XI Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales (CORENDE), T15, 13 pág., Compilado por Marta Ruch, 1a ed. AAENDE, San Martín, 2017. ISBN 978-987-23957-9-7.

ÍNDICE

Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Capítulo 1. Introducción.....	6
1.1 Introducción	6
1.2 Justificación y formulación del problema.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.4 Metodología y delimitaciones.....	9
Capítulo 2. Marco teórico.....	11
2.1 Materiales compuestos	11
2.1.1 Generalidades	11
2.1.2 Fabricación	13
2.1.3 Materiales compuestos CFRP	16
2.1.4 Daño en los materiales compuestos CFRP	18
2.2 Emisión Acústica.....	23
2.2.1 Generalidades	23
2.2.2 Ventajas y desventajas de la EA	25
2.2.3 Propagación de las ondas elásticas.....	27
2.2.4 Eventos fuera del plano (OP) y eventos dentro del plano (IP).....	29
2.2.5 Efecto Kaiser	30
2.2.6 Efecto Felicity	31
2.2.7 Señales de EA.....	31
2.2.8 Parámetros de EA.....	32
2.4 Ensayo de flexión de viga corta.....	36
2.5 Resumen de normas	38
Capítulo 3. Estado del arte	43
3.1 Introducción.....	43
3.2 Ensayos de tracción	44
3.3 Ensayos de fatiga.....	49
3.4 Ensayos de flexión en tres puntos	51
3.5 Atenuación en compuestos de matriz polimérica	55
3.6 Otras aplicaciones de la EA en materiales compuestos	58

Capítulo 4. Parte experimental.....	60
4.1 Introducción	60
4.2 Confección de laminados de CFRP por el método de laminación manual con bolsa de vacío y autoclave	61
4.3 Corte de probetas:	64
4.3.1 Corte de probetas del lote NUar.....	64
4.3.2 Corte probetas del lote NUbr.....	66
4.3.3 Corte de probetas laminadas manualmente	67
4.3.4 Corte de probetas del lote KB	68
4.3.5 Corte de probetas del lote KC.....	69
4.3.6 Resumen de dimensiones	70
4.4 Ensayos	71
4.4.1 Equipamiento	71
4.4.2 Ensayos sin EA.....	75
4.4.3 Ensayos con EA	75
4.4.4 Ensayos de sólo resina	78
4.5 Imágenes y Micrografías.....	79
4.6 Software de procesamiento de las señales	81
Capítulo 5. Resultados, análisis y discusión.....	83
5.1 Estimación de la atenuación y la velocidad del sonido en las probetas.....	83
5.2 Resultados de los ensayos mecánicos.....	84
5.3 Resultados de EA	95
5.3.1 Lote NUar.....	95
5.3.2 Lote NUbr	104
5.3.3 Lote VU	106
5.3.4 Lote VB	110
5.3.5 Lote NB	113
5.3.6 Lote KB	115
5.3.7 Lote KC.....	117
5.4 Análisis estadístico de las cuentas y la amplitud en los lotes considerados	119
5.5 Análisis FFT y wavelets.....	121
5.6 Imágenes y Micrografías.....	132
Capítulo 6. Conclusiones	148
Referencias	153
Anexo I: Ensayos sobre paneles Sándwich.....	I

AGRADECIMIENTOS

A Martín Gómez, Aníbal Rodríguez, Ezequiel Poodts, Sebastián Otero, Ricardo Montero, Guillermo Arnaldo, Diego Cowes y al grupo de ondas elásticas ICES.

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de diferentes probetas de materiales compuestos que poseen características constructivas y resistencias particulares, caracterizándolas por medio de ensayos de flexión en tres puntos y Emisión Acústica. Los especímenes provienen de laminados de fibra de carbono con resina de cianato éster o epoxi, cuyas fibras están orientadas en la misma dirección o alternando sus capas en una secuencia de apilamiento de $[0^\circ/90^\circ]$, y fabricados con materia prima en buenas condiciones o vencida. También se estudian cupones curvos provenientes de una sección de tubo circular y un laminado más ancho con fibras de vidrio entretejidas a las fibras de carbono. Con estas variables, se obtienen las características específicas de cada lote de probetas y se comparan entre sí para poder comprender los mecanismos de falla que ocurren durante las sollicitaciones mecánicas, así como su relación con los distintos parámetros mecánicos y acústicos.

Los resultados mostraron que las probetas fabricadas con material vencido tienen una resistencia mecánica comparable a la resistencia de las que están fabricadas con material nuevo, y que en el caso vencido la resina es la parte que más se deteriora. La Emisión Acústica detectó los daños tempranos y tardíos producidos en cada probeta, siendo las cuentas y la energía los parámetros que mejor indican el comienzo de cada uno de ellos, respectivamente. Las pruebas en las que se detuvo la flexión antes de alcanzar la carga máxima, junto con las micrografías de los especímenes ensayados, permitieron estudiar y comprender el progreso del daño en las probetas con matriz de cianato éster, revelando que los primeros daños son micro roturas de fibras en los laminados unidireccionales, y también delaminaciones menores en los bidireccionales.

El objetivo principal y los objetivos específicos pudieron cumplirse.

Palabras clave: Materiales compuestos CFRP; Emisión acústica; Ensayo de flexión en tres puntos; Progreso del daño.

ABSTRACT

In this work, the mechanical behavior of different specimens of composite materials is analyzed, by means of tree point bending tests and Acoustic Emission. The specimens come from fiber carbon laminates with cyanate ester or epoxy matrix, and the fibers are oriented all in the same direction or with a stacking sequence of $[0^\circ/90^\circ]$. The raw material is either new or expired. Coupons from a circular section of a tube and a wide laminate with glass fibers woven between carbon fibers are also studied.

With these variables, the specific characteristics of each batch of specimens are obtained and compared to each other. In this way, the failure mechanisms during the load and his relationship to the different mechanical and acoustic parameters are understood.

Results show that specimens manufactured with expired raw material have a mechanical resistance comparable to the specimens manufactured with new material. In the first case, it is the resin that deteriorated more than the fibers. Acoustic Emission detected early and late damage in the specimens. Counts are the better parameter to detect early damage, and the energy is the better parameter to detect the late damages. By stopping the load before it reaches the maximum load, and using optical microscopy, it is possible to study and understand damage progress in the cyanate ester specimens. Also, these techniques revealed that fiber micro-breaks are the first damages in the unidirectional specimens, and fiber micro-breaks together with minor delaminations are the first damages in the bidirectional specimens.

The main objective and the specific ones could be fulfilled.

Keywords: CFRP composite material; Acoustic emission; Tree point bending tests; Damage progress.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se establecen los puntos básicos del tema de estudio tratado durante el desarrollo de esta tesis, se mencionan la justificación y formulación del problema, se definen los objetivos y se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación realizada. Además se define su alcance.

1.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son una parte importante de los recursos utilizados actualmente en la ingeniería para el diseño y la fabricación de muchos productos y componentes que están presentes en todo tipo de aplicaciones. Se distinguen de los metales, los plásticos y los cerámicos en que combinan dos o más materiales dando como resultado una composición única de propiedades finales que son mejores que las propiedades individuales de sus constituyentes. Así, sus prestaciones y características, como la gran eficiencia en la relación resistencia mecánica-densidad, o fuerza-peso, les dan el potencial de reemplazar al acero y al aluminio, dos materiales ampliamente utilizados, y muchas veces con un mejor rendimiento [1]. Es por ello que el estudio de los mismos es de gran interés para tener una comprensión más abarcativa de su comportamiento mecánico, permitiendo a futuro continuar extendiendo su uso, reducir los costos, admitir mejoras de diseño, y evaluar de forma más efectiva su desempeño en servicio, entre otros.

Por otra parte, el método de ensayo no destructivo (END) de la emisión acústica (EA) ha ganado popularidad y terreno debido a las mejoras en hardware, software y capacidad de procesamiento que la tecnología le ha proporcionado, junto con sus propiedades y características que lo distinguen de otros métodos de END como ser, por ejemplo, el ultrasonido (US). Este método ha sido usado para monitorear las condiciones estructurales y caracterizar el daño de prácticamente todo tipo de materiales y sistemas [2-4], mientras que la caracterización mecánica complementada con el método de EA ha demostrado ser un soporte ideal para el estudio del comportamiento de los mecanismos de falla que poseen los materiales compuestos, ya que permite obtener un conocimiento más completo y sensible de los procesos de daño en el conjunto mientras se están produciendo [5-8].

En la presente tesis de maestría se apunta a un avance en la metodología de los ensayos mecánicos, la medición, el análisis y la interpretación de los resultados de EA en materiales compuestos con el fin de obtener una mayor comprensión de los mecanismos de falla y sus características durante las sollicitaciones mecánicas. En particular, se trabaja sobre un material compuesto denominado “polímero reforzado con fibras de carbono”, o CFRP por sus siglas en inglés, y se le implementan ensayos mecánicos conocidos como “ensayos de flexión de viga corta”.

La estructura de esta tesis está organizada de la siguiente manera: Primero, en los siguientes apartados del capítulo 1, se formula el problema y se justifica la investigación, nombrando los objetivos y la metodología que se siguió en este trabajo. Luego, en el capítulo 2, se presenta el marco teórico necesario para comprender las

definiciones y términos utilizados en los siguientes capítulos, incluyendo los conocimientos básicos sobre materiales compuestos y EA. Posteriormente, en el capítulo 3, se presenta el estado del arte, compilando y resumiendo los trabajos más importantes y relevantes que se revisaron hasta la fecha sobre el tema de estudio tratado. El capítulo 4 contiene las descripciones del equipamiento utilizado y las metodologías adoptadas para realizar los ensayos mecánicos con EA sobre los materiales compuestos estudiados, y en el capítulo 5 se presentan los resultados, junto con su análisis y las discusiones que de ellos se desprenden. Finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones.

El anexo I presenta un estudio aparte en el que se aplicó la EA a estructuras sofisticadas de paneles sándwich, indicando que este método de caracterización no se limita a laminados de CFRP y que sus beneficios pueden ser utilizados en distintas circunstancias.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de la investigación sobre materiales CFRP radica en que los mismos suelen ser componentes estructurales críticos en aplicaciones de alta gama donde el rendimiento debe estar asegurado y la falla no puede permitirse por debajo de ciertos valores. La detección temprana del daño es importante en los CFRP porque la acumulación gradual de defectos puede derivar en un crecimiento rápido y descontrolado que termina en una falla catastrófica del compuesto. Conocer el comportamiento de los daños a lo largo del proceso de carga puede conducir a un diseño mejorado con una mayor resistencia contra el inicio de grietas y al establecimiento de criterios de medición y control sobre estos proyectos, los cuales pueden llegar a estandarizarse una vez validados. Monitorear la EA y sus parámetros durante las pruebas mecánicas (y también, durante la puesta en servicio) de estos materiales es una herramienta capaz de proveer información significativa respecto del daño que la carga induce en ellos, e incluso podría proporcionar una advertencia previa de la falla próxima. De esta manera, caracterizar y comparar entre sí distintos laminados de CFRP bajo cargas de flexión utilizando la EA ayuda a comprender el progreso del daño en los mismos y relacionar sus comportamientos (tanto mecánicos como de EA) con las distintas variables que entran en juego en cada caso.

En esta tesis, se comparan laminados cuyas fibras se encuentran orientadas todas en la misma dirección (unidireccionales), con laminados cuyas fibras tienen una secuencia de apilamiento de $[0^\circ/90^\circ]$ (bidireccionales), y fabricados con material en buenas condiciones y vencido, además de laminados con fibras de vidrio entretejidas dentro del CFRP y probetas curvas procedentes de una sección de tubo circular fabricado por medio de un proceso diferente al de las otras (filament winding). Con estos lotes, y los resultados de los ensayos realizados, es posible analizar el progreso del daño y evaluar la influencia de cada variable en la calidad del material, sirviendo como guía para la aplicación del método y en las investigaciones posteriores, además de generar información procesada que puede seguir analizándose.

La elección del ensayo de flexión de viga corta por sobre los otros es debido a que se desarrollan tensiones de tracción y compresión al mismo tiempo, induciendo más de un tipo de daño a la vez en una prueba sencilla y de fácil implementación.

Las principales preguntas que motivan esta investigación son:

¿Cómo se puede implementar el método de la EA en el monitoreo del estado de los materiales CFRP durante su sollicitación mecánica?

¿Cuál es la influencia de esta implementación en los resultados mecánicos?

¿Cuál es el estado actual en la investigación sobre materiales CFRP bajo distintas cargas de sollicitación mecánica?

¿Qué tipo de variables no han sido consideradas hasta ahora?

¿Cuáles son las ventajas y las desventajas de aplicar la EA en los materiales compuestos?

¿Qué información se puede obtener al registrar la EA en los ensayos de flexión de viga corta?

¿Cómo se procesa y analiza esta información?

¿Qué normas regulan estos ensayos?

¿Consideran estas normas la implementación de la EA como método de END adjunto?

A lo largo de este trabajo se intentará dar respuesta a todos estos interrogantes.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis de maestría es:

Analizar y documentar el comportamiento mecánico de probetas de materiales compuestos de diferentes lotes y proveedores, caracterizándolo, a su vez, por medio del método de ensayo no destructivo de la emisión acústica.

Los objetivos particulares de esta investigación son:

- Contribuir al entendimiento del comportamiento de los materiales compuestos frente a las sollicitaciones mecánicas utilizando el método de END de la EA como herramienta de caracterización.
- Especificar propiedades, características y rasgos importantes del fenómeno de la rotura de los materiales compuestos y de su EA relacionada.
- Conocer la relación o grado de asociación que existe entre la curva de carga de las probetas ensayadas y los distintos parámetros de EA registrados en los ensayos mecánicos realizados, tratando de asociar las distintas variables a los mecanismos de falla que se presentan en los materiales compuestos CFRP.
- Realizar la puesta a punto de los métodos de medición experimentales, estandarizando a su vez los procedimientos de medición de EA en ensayos mecánicos.

- Fabricar laminados propios de material compuesto CFRP a partir de pre impregnados para su posterior ensayo y caracterización por medio de ensayos de flexión de viga corta y EA.
- Desarrollar programas de procesamiento y análisis de datos que ayuden a visualizar y resolver los resultados adaptándose a las necesidades de cada proyecto realizado.

1.4 METODOLOGÍA Y DELIMITACIONES

El método para responder las preguntas de la investigación consistió en hacer ensayos mecánicos sobre probetas de material compuesto CFRP sin incluir e incluyendo a la EA en los mismos, de manera que se pudieran obtener los parámetros mecánicos y de EA en cada uno de ellos.

La metodología que se siguió durante la realización de esta tesis comenzó con el relevamiento exhaustivo de la literatura en los temas de interés a través de bancos documentales. La búsqueda de información teórica abarcó los temas de los materiales compuestos en general, el método de la EA, los ensayos mecánicos y la normativa vigente aplicable a los ensayos con materiales compuestos, además de parámetros específicos como los que se definen en el marco teórico. Junto con esto se recopilaron los trabajos que sirven de antecedentes para esta investigación, clasificándolos según su temática. La segunda etapa consistió en realizar probetas de ensayo a partir de placas de material compuesto previamente fabricado proveniente de cuatro lotes distintos, incluyendo: dos placas unidireccionales de CFRP utilizadas para un proyecto aeroespacial vigente, una placa bidireccional fabricada por la empresa de materiales compuestos Kohlenia, y una sección de tubo elaborada por la misma empresa con el proceso de filament winding. También se fabricaron tres laminados de CFRP a partir de pre impregnados con el proceso de laminación manual con bolsa de vacío y autoclave. Dos de estos laminados fueron fabricados con pre impregnados cuyo material ya había superado su fecha de vencimiento por más de un año (un laminado unidireccional y otro bidireccional), mientras que el otro fue fabricado con material que no estaba vencido (laminado de forma bidireccional). El tercer paso fue la realización de los ensayos de flexión de viga corta con y sin EA sobre estas probetas, para lo cual fue necesario diseñar un dispositivo de soporte que mantuviera a los sensores piezoeléctricos en contacto con algunas de las probetas (debido principalmente a su pequeño tamaño). Una parte de los ensayos se realizó sobre probetas unidireccionales cuyas fibras no ofrecían su máxima resistencia a la tracción, de manera que sea la resina quien soportara la mayor parte de la carga y se pudiera estimar la resistencia máxima y la EA de la misma. En la siguiente etapa se analizaron todos los resultados por medio de programas de análisis de datos tanto propios como comerciales (incluyendo gráficos de hasta cuatro parámetros, análisis en frecuencia y análisis por medio de wavelets) y por medio de micrografías ópticas del material ensayado. Luego los resultados se discutieron, comparándolos con la bibliografía y extrayendo conclusiones. Finalmente se redactaron las conclusiones.

Por otra parte, el alcance de esta tesis se limita a lo siguiente:

- Los materiales investigados serán laminados de fibra de carbono con matriz de cianato éster o epoxi. También se incluirá un laminado de CFRP con fibras de vidrio entretejidas a las fibras de carbono, y un trabajo aparte sobre paneles sándwich en el anexo I, pero no se harán ensayos sobre otro tipo de materiales compuestos, como compuestos con matrices basadas en otros polímeros.
- El ensayo de sollicitación mecánica para los laminados de CFRP será el ensayo de flexión en tres puntos conocido como ensayo de flexión de viga corta. No se harán otro tipo de ensayos, excepto para los paneles sándwich del anexo I.
- Las mediciones de EA se harán con dos canales. Las señales se estudiarán tanto de forma cualitativa como cuantitativa, pero no se hará streaming¹ de las mismas. Tampoco se harán localizaciones de las fuentes de EA.

Asimismo, debido a que en este trabajo de maestría se buscan especificar propiedades, características y rasgos importantes de la relación entre la resistencia mecánica, los modos de falla y el fenómeno de la EA para los materiales compuestos, tratando de describir tendencias de varios grupos de probetas y mostrar con precisión los ángulos o dimensiones del fenómeno, pero, a su vez, tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más variables en un contexto en particular, tratando de asociarlas mediante un patrón predecible para saber cómo se puede comportar una de ellas al conocer el comportamiento de las otras que están vinculadas, se especifica que su alcance es descriptivo-correlacional [9].

¹ El streaming, en emisión acústica, es el método por el cual la señal registrada por los sensores se almacena de forma completa a lo largo del tiempo, en lugar de almacenar solamente los instantes en los que se producen eventos que superen un umbral de detección prefijado.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen los conceptos, términos y parámetros físicos necesarios para la correcta comprensión de este trabajo, incluyendo una descripción de los materiales compuestos, la EA, el ensayo de flexión de viga corta y un resumen de las normas que regulan actualmente los ensayos de flexión en tres puntos.

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

2.1.1 Generalidades

En una definición general, los materiales compuestos son la combinación de dos o más materiales diferentes que en conjunto forman otro material con propiedades finales únicas distintas a las de sus constituyentes. Sin embargo, esta definición es muy vasta, y puede incluir aleaciones de metales, copolímeros plásticos, minerales y hasta madera [1]. Acotando, se los puede definir como la combinación macroscópica de dos o más materiales distintos que tienen una interface reconocible entre ellos; es decir, que los componentes pueden ser identificados individualmente, y que, si están bien diseñados, generalmente exhiben las mejores cualidades de sus componentes, incluyendo algunas que ninguno de los constituyentes posee [10]. La idea esencial es la de utilizar las ventajas de un material (por ejemplo alto módulo o resistencia) en combinación con las ventajas de otro (como puede ser su baja densidad, o resistencia a la corrosión), pudiéndose obtener mayor resistencia, menor peso, resistencia en direcciones preferenciales, etc., para así crear un material que tenga las características necesarias para desarrollar una determinada tarea.

Como concepto, los materiales compuestos están presentes en la naturaleza (madera, caparazones de invertebrados), y su fabricación y uso por parte del hombre se encuentra referenciado a lo largo de toda la historia (adobes de barro y paja utilizados por los israelitas, madera contrachapada realizada por los egipcios, arcillas mezcladas con hojas o cáscaras en la antigua Grecia), resolviendo problemas ingenieriles y tecnológicos por mucho tiempo, pero las aplicaciones comerciales a gran escala de los materiales compuestos comenzaron durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), con aplicaciones en la marina, y no fue hasta la década de los 60 cuando estos materiales comenzaron a capturar la atención de las industrias, al introducirse los compuestos basados en polímeros. Desde entonces, los materiales compuestos se han convertido en productos de ingeniería comunes y están diseñados y fabricados para diversas aplicaciones, incluyendo componentes automotrices, artículos deportivos, piezas aeroespaciales, bienes de consumo, y en las industrias marina y petrolera [1].

El crecimiento en el uso de los compuestos se produjo debido a una mayor conciencia sobre el rendimiento del producto y una mayor competencia en el mercado mundial de componentes livianos. Justamente, han sido diseñados y fabricados para aplicaciones en las que se necesita de un alto rendimiento y un peso ligero, teniendo la capacidad de reemplazar, debido a sus ventajas, a muchos de los materiales de ingeniería tradicionales (por ejemplo, los materiales compuestos pueden ofrecer la

rigidez del acero en un quinto de su peso e igualar la del aluminio en la mitad del mismo, con una fuerza específica que se encuentra entre tres a cinco veces más alta que la de estos materiales [1]). Estos factores, sumados a la disminución en el costo de las fibras y al desarrollo de técnicas de automatización y métodos de producción de gran volumen, hicieron que al día de hoy sea difícil encontrar industrias que no utilicen los beneficios de los materiales compuestos, abarcando, como ya se dijo, los mercados aeroespacial, automotriz, marino, de la construcción y los productos de consumo, entre otros. De esta forma, gracias al desarrollo de nuevos y mejorados procesos de fabricación, se han creado una cantidad ilimitada de productos y oportunidades de diseño para los compuestos. Las principales barreras que afectan a estos materiales al momento de ser escogidos frente a otros son: el costo inicial respecto a la opción de utilizar materiales tradicionales, y las dificultades en su reciclado [1].

Respecto a su constitución, típicamente se reconocen dos componentes fundamentales en los materiales compuestos: la matriz, y los refuerzos. De las propiedades específicas de cada uno de estos componentes, y de sus volúmenes respectivos, dependerán las propiedades finales del compuesto.

La matriz es la fase continua que envuelve al refuerzo, manteniéndolo en su lugar dentro de la estructura y dándole rigidez y forma al conjunto. Su función principal es la de transmitir los esfuerzos entre los refuerzos. Otras funciones importantes de la matriz son: aislar a los refuerzos individualmente para que puedan actuar por separado, protegerlos contra agentes externos como químicos o daños mecánicos (tanto en la estructura como durante y después de la fabricación del material), proporcionar una buena calidad de acabado superficial en la pieza, controlar las propiedades eléctricas y químicas del compuesto y soportar las fuerzas de corte interlaminar [1, 10, 11]. Según el material que se utilice como matriz, se distingue entre materiales compuestos de matriz polimérica, metálica o cerámica. En el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica, esta puede estar hecha de polímeros termoestables como el cianato éster, epoxi, vinilester, poliéster, fenólica, etc, o de polímeros termoplásticos, como el polipropileno, policarbonato, acetato, nylon o poliamida, por citar algunos. Las ventajas de utilizar polímeros termoestables son que se usan en forma líquida, su fácil moldeo, baja viscosidad, buen mojado de los refuerzos y la baja relajación por creep². En este caso es común la utilización de pre impregnados con fibras, llamados prepregs, que consisten en una lámina de fibras orientadas en la misma dirección embebidas en resina sin curar, sirviendo de materia prima para conformar los CFRP. Las matrices más utilizadas para los materiales compuestos avanzados han sido las resinas epoxi [11]. Para las aplicaciones de alta temperatura, sin embargo, las matrices epoxi poseen una resistencia a la llama y a la ablación inferiores a otros sistemas químicos utilizados en la industria aeroespacial, como las resinas fenólicas [12], o las matrices cerámicas, utilizadas para aeronáutica y tecnología espacial debido a su alta resistencia a temperaturas de hasta 1800 °C [13].

Los refuerzos son fibras o partículas, normalmente mucho más resistentes que la matriz, presentes dentro de la misma con el objetivo de aumentar la resistencia del

² El creep, o fluencia lenta, es el incremento de la deformación que sufre un material viscoelástico cuando está sometido a una tensión mecánica contante.

compuesto sin comprometer su densidad. En el caso de las fibras, sus funciones principales son soportar la carga (en un material compuesto estructural, entre el 70 y el 90% de la carga es soportada por las fibras), proveer rigidez, fuerza y estabilidad termal en el compuesto, y proveer conductividad o aislación eléctrica, dependiendo del tipo de fibra que se utilice [1]. Estas pueden ser cortas o continuas, estar orientadas en una misma dirección, en direcciones preferenciales o al azar, y ser de grafito, vidrio, carbono, boro o aramida (kevlar), entre otras. Dependiendo de la concentración de las fibras (porcentaje de fibra y resina), de su relación de aspecto (longitud dividida el diámetro) y de la isotropía (orientación de las mismas), se pueden obtener muchas propiedades distintas para un mismo tipo de compuesto. También se pueden combinar distintos tipos de fibras o refuerzos dentro del mismo material [11].

Cada una de estas opciones en la elección de la matriz y el refuerzo tendrá sus ventajas y desventajas respecto a las otras [10, 11], y su elección final estará determinada por la aplicación que se le dará al producto y los requerimientos de uso que este conlleva. Según Fotouhi *et al.*, las características más importantes de un material compuesto son su estructura anisotrópica, su no homogeneidad, y la falta de deformación plástica [14].

2.1.2 Fabricación

Hay muchas maneras de fabricar materiales compuestos. Su confección debe estar orientada a conseguir un producto consistente, minimizar las porosidades, reducir las tensiones residuales internas y realizarlo de una manera poco costosa. La elección del proceso dependerá, además, de la aplicación para la cual el material será utilizado y de las propiedades de diseño del mismo [11].

En principio, la confección de los materiales compuestos puede clasificarse según si el proceso es manual o automático, y si se realiza a molde abierto o a molde cerrado.

Las técnicas más habituales para fabricarlos son las siguientes:

- Laminación manual o proceso lay-up
- Filament winding
- Pultrusión
- Moldeo por transferencia de resina
- Proceso spray-up

Debido a que los otros métodos exceden al alcance de esta tesis, se explicarán solamente el proceso de laminación manual (con pre impregnados, bolsa de vacío y autoclave) y el proceso de filament winding.

2.1.2.1 Laminación manual o lay-up

La laminación manual es la manera más sencilla de fabricar un material compuesto; sin embargo, es la más laboriosa. La ventaja del método de laminación manual es la libertad de hacer la cantidad de capas que se deseen en casi cualquier forma deseada [15]. Está dividida principalmente en dos grandes métodos: lay-up húmedo y lay-up con prepreg.

El primero de ellos era el método dominante de fabricación de partes compuestas en los primeros años, y actualmente se sigue utilizando ampliamente en la industria marítima como así también para la fabricación de prototipos, ya que la técnica de lay-up húmedo permite procesar componentes de gran tamaño y obtener materiales compuestos de gran calidad a menor costo [16]. La razón de que no sea tan difundido es que es muy laborioso y que, al ser de molde abierto, se producen emisiones de estireno que son perjudiciales para la salud si no se toman las precauciones necesarias para realizarlo.

El método de lay-up con prepreg, también llamado de procesamiento con autoclave o bolsa de vacío, es un método a molde abierto que permite fabricar formas complicadas con bajos valores de porosidad y gran contenido en volumen de fibras. En este proceso, se utilizan pre impregnados o prepregs, que son un grupo de fibras previamente impregnadas en resina polimérica presentado en forma de láminas muy finas, que crean una cinta de generalmente 304 mm de ancho y cuya longitud está definida por el tamaño de las bobinas comercializadas. Estas láminas se encuentran intercaladas entre capas protectoras de papel o plástico para poder ser enrolladas sin interrumpirse en un carrete (Figura 1). Usualmente una capa individual de pre impregnado tiene un espesor de 0,125 ó 0,25 mm y sus fibras pueden ser continuas y paralelas (prepreg unidireccional) o entretejidas (prepreg entretejido), mientras que la resina puede ser de un polímero termoestable (caso del epoxi y el cianato éster) o termoplástico. En el caso de los pre impregnados con fibras de carbono unidireccionales y resina termoestable, deben ser guardados en un freezer hasta que se los requiera, para evitar el deterioro de las propiedades de la matriz, pudiendo almacenarse (en el caso de los epoxis) normalmente 18 meses a una temperatura inferior a los -17°C . Si el pre impregnado ha excedido su fecha de vencimiento, probablemente todavía pueda utilizarse por, al menos, otros 6 meses; sin embargo, su aptitud debe comprobarse moldeando un panel de prueba, o verificando el estado del curado de la resina de la matriz mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) [17].

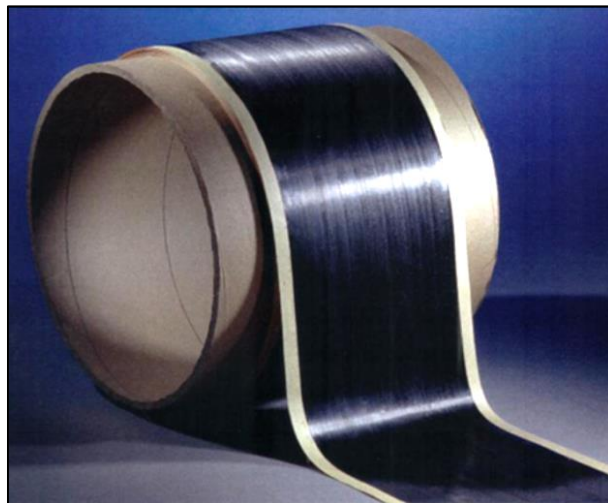


Figura 1: Rollo comercial de pre impregnado unidireccional de fibras de carbono.

Durante la fabricación del material, el prepreg es cortado, colocado en varias capas apiladas sobre un molde de una sola cara en la orientación de las fibras deseada, comprimido manualmente o con rodillos y sellado con una bolsa para poder aplicar vacío. De esta forma se eliminan las burbujas y el aire atrapado entre las capas. Luego, el molde es colocado en un horno autoclave³ dentro del cual la presión externa compacta el laminado y la temperatura permite el curado de la resina, obteniendo así la pieza con la forma final deseada. Este método es muy laborioso comparado con otros procesos de gran volumen como el laminado húmedo, el filament winding o la pultrusión; sin embargo, para construir prototipos o piezas pequeñas en pocas cantidades, es el método más adecuado y que provee mayores ventajas respecto a la calidad en estas aplicaciones. Los prepregs más utilizados en este proceso son los prepregs de fibra de carbono y resina epoxi, ya que son más ligeros y fuertes que otros tipos de pre impregnados y proporcionan mayores ahorros de masa en el componente. Las ventajas de utilizar prepregs frente al método de lay-up húmedo son que los mismos reducen el daño que se produce al manipular las fibras secas, permiten mayor homogeneidad entre los productos terminados y facilitan la acomodación de las fibras y la desgasificación durante el curado, reduciendo las porosidades y mejorando la impregnación de las fibras [1, 11].

Debido a su calidad y precisión, este proceso es el más utilizado en la industria aeroespacial.

2.1.2.2 Filament winding

El método de fabricación por filament winding es un proceso automático en el cual fibras continuas embebidas en resina y agrupadas en forma de manojos se enrollan sobre un mandril giratorio en diferentes direcciones, controlando en su deposición el ángulo y la velocidad de giro del conjunto (Figura 2). El mandril puede ser cilíndrico, redondo o de cualquier otra forma, siempre que no tenga curvaturas especiales que dificulten la colocación de las fibras. Por su parte los refuerzos pueden ir envolviéndose en bandas adyacentes o superpuestas hasta cubrir la superficie necesaria del mandril. Subsecuentemente, el conjunto de las fibras embebidas y el mandril es curado a altas temperaturas, retirando finalmente este último al terminar la etapa [10, 11, 16].

Este proceso es adecuado para fabricar partes tubulares. Se puede automatizar para fabricar piezas en gran volumen y de manera rentable, siendo la única técnica de construcción adecuada para estructuras especializadas, como los recipientes a presión.

Los productos más comunes producidos por el proceso de filament winding son las estructuras tubulares, los recipientes a presión, las tuberías, cubiertas de motores de cohetes, tanques de almacenamiento de químicos y tubos de lanzamiento de cohetes. Es un proceso que ha adquirido una importancia comercial significativa debido a su capacidad para depositar las fibras en un ángulo preciso en la superficie del mandril.

³ Un autoclave es un recipiente a presión, con una tapa de apertura y cierre rápido, tipo bayoneta, que permite imponer a los materiales que se coloquen en su interior un ciclo de calentamiento y presión según una consigna predeterminada [18].

A diferencia del método de laminación manual con autoclave, es menos costoso y permite generar piezas en mayor volumen. Sin embargo, no alcanza a obtener una fracción de volumen de fibras mayor al 60%, y tiene dificultades para obtener una distribución de fibra y resina uniforme a lo largo del espesor, pudiendo tener también mayor contenido de aire atrapado entre las pasadas (porosidades) [1].

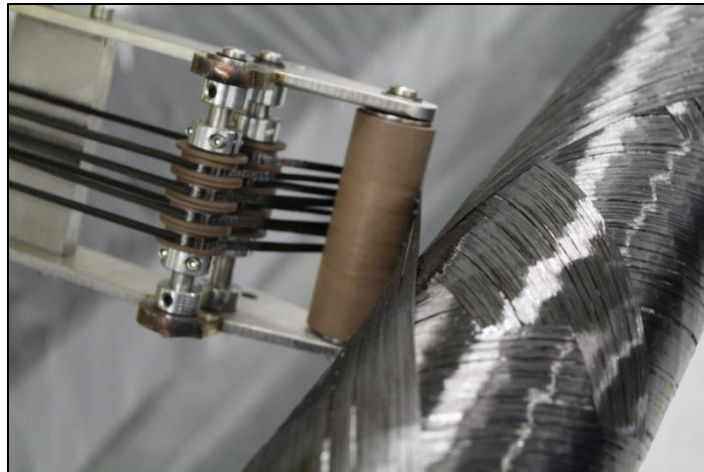


Figura 2: Proceso de fabricación de un tubo por filament winding.

2.1.3 Materiales compuestos CFRP

Los polímeros reforzados con fibra de carbono, o CFRP, son materiales compuestos formados por una matriz polimérica y refuerzos de fibras de carbono, que tienen propiedades térmicas y mecánicas significativamente distinguidas y presentan interacciones complejas entre sus constituyentes durante su mecanizado [19], exhibiendo también diferentes comportamientos en las sollicitaciones del servicio o de un ensayo mecánico.

Su alta relación fuerza-peso, la excelente tolerancia a la corrosión y fatiga, su resistencia al calor y el control general de sus características (versatilidad) han permitido su uso extensivo en aeronaves, naves espaciales, automóviles, estructuras arquitectónicas, materiales de construcción naval y artículos deportivos [20]. Ofrecen un módulo y una resistencia que son similares e incluso superiores a las de muchos materiales metálicos. Al mismo tiempo, su baja densidad les otorga excelentes propiedades específicas [21]. Así, los polímeros reforzados con fibra de carbono son un material estándar en aplicaciones en las que se requiere de gran rigidez y resistencia con un mínimo peso [22], siendo elegidos desde hace décadas para todo tipo de aplicaciones de alto desempeño.

En el caso puntual de la industria aeroespacial, los materiales utilizados deben cumplir requisitos específicos como estabilidad dimensional, alta tenacidad y resistencia a altas temperaturas. Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono surgen como los indicados para estas aplicaciones. A su vez, para alcanzar los estándares necesarios de propiedades mecánicas, es necesario asegurar un mínimo contenido de porosidad y alcanzar un elevado contenido de fibras en el material compuesto [16]. Como ya se ha visto, la técnica industrial que permite obtener estas características es el procesamiento de laminación manual con autoclave.

Sin embargo, a pesar del control de calidad durante su fabricación, el material puede contener muchos defectos internos [15]. Desventajas de los materiales compuestos reforzados con fibras incluyen su bajo módulo de elasticidad, alto potencial a sufrir creep, dificultad para unirlos y falta de métodos de diseño [15], así como la poca facilidad de su reciclado [1]. Además, debido a la existencia de dos o más fases diferentes, los compuestos CFRP sufren de diferentes tipos de problemas en su mecanizado [15, 23], lo que puede conducir a reducir su vida en fatiga y la resistencia de la pieza [15].

2.1.3.1 Laminados de CFRP

Un laminado de CFRP es un conjunto de láminas de matriz y refuerzo agrupadas en una secuencia de apilamiento determinada (de manera de tener las fibras en direcciones particulares a lo largo del espesor del laminado) que ha sido curado por algún método de aplicación de calor y presión, como en el proceso de lay-up con prepreg que utiliza la bolsa de vacío y el autoclave. Cada capa del laminado está unida a sus vecinas por medio de la resina que las forma individualmente; no se utiliza ni añade ningún otro material para ligarlas [10].

El objetivo de un laminado compuesto es alcanzar la estructura más ligera y eficiente posible alineando la mayoría de las fibras en la dirección de la carga. Sin embargo, muchas veces existe la necesidad de producir un compuesto que tenga algunas propiedades isotrópicas, similares a las del metal, debido a múltiples o indefinidas rutas de carga [11]. Por esta razón, los laminados unidireccionales son poco utilizados, reservándose su uso a los casos en los que la dirección de la carga es absolutamente conocida. En la mayoría de los casos, las capas están orientadas en al menos dos ángulos diferentes, especificándose su secuencia de apilamiento según estos ángulos. Los ángulos más utilizados son 0°, 45° y 90°, en donde 0° es la dirección de la carga en el caso de un ensayo de tracción uniaxial.

A los efectos de este trabajo, en los que no se utilizaron laminados con capas orientadas a 45°, los laminados en los que la dirección de las fibras es única a lo largo de todo el espesor se llamarán de ahora en más laminados unidireccionales, y los laminados en los que las fibras alternaban capas de 0° y 90° se llamarán laminados bidireccionales.

La identificación de los ángulos de apilamiento de un laminado se conoce como código de laminado. Esto es, una secuencia alfanumérica que permite la identificación unívoca de cada lámina de pre impregnado en el apilamiento.

El código más sencillo es el desarrollado, en el que se nombra el ángulo que corresponde a cada capa sin abreviatura, y este código completo se coloca entre corchetes, separando cada lámina por una barra inclinada.

Por ejemplo, un laminado de 8 capas sería:

$$[0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 90^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ]_T$$

Donde la letra T, colocada como subíndice, significa que es el laminado total. Cuando no haya dudas sobre que el laminado es total, este subíndice puede obviarse.

En el caso de un apilamiento más extenso, se puede hacer una primera simplificación, que es agrupar las láminas que tienen un mismo ángulo y que son

contiguas, colocando un subíndice para cada ángulo de laminado, con un número que represente el número de capas contiguas, lo que resultaría en:

$$[0^{\circ}_3 / +45^{\circ}_3 / 90^{\circ}_4 / +45^{\circ}_3 / 0^{\circ}_3]_T$$

Como este laminado es simétrico, se puede hacer una segunda simplificación, que es:

$$[0^{\circ}_3 / +45^{\circ}_3 / 90^{\circ}_2]_S$$

Donde la letra S como subíndice significa que el laminado es simétrico, y para este caso es la máxima simplificación posible.

Se puede escribir otro laminado como:

$$[0^{\circ}_3 / +45^{\circ}_3 / 90^{\circ}_2]_{4S}$$

Donde el número 4 del subíndice del corchete significa que se repite el laminado simétrico por 4 veces. También pueden obviarse los símbolos de grados y los positivos, quedando otros laminados de la siguiente manera:

$$[0_2 / 90_4]_S$$
$$[0 / 45 / -45 / 90]_{2S}$$

Estas son, en general, las reglas que se utilizan para los códigos de laminado. Puede ocurrir que sobre un mismo plano de laminado exista más de un código. Este sería el caso de, por ejemplo, un refuerzo sobre un panel. Para estos casos, se consideran laminados superpuestos independientes, y cada uno de ellos tiene su propio código de laminado [18].

2.1.4 Daño en los materiales compuestos CFRP

Si bien el daño por ataque químico (comúnmente encontrado en tanques y recipientes a presión), la degradación ambiental y los defectos producidos por una mala fabricación, almacenamiento y/o transporte son algunas de las causas de deterioro en las estructuras poliméricas reforzadas con fibras [24], el daño mecánico es la causa más común de daño en los CFRP.

Principalmente, en estos materiales se distinguen cuatro tipos de daño: desunión fibra matriz, agrietamiento de la matriz, delaminación, y rotura de fibras. Si bien el procedimiento de la acumulación de daño en las estructuras compuestas es un fenómeno complejo de naturaleza estocástica que depende de un gran número de parámetros tales como el tipo de carga, la secuencia de apilamiento, las propiedades del material, etc. [5], se puede relacionar el progreso del daño con estos cuatro tipos de mecanismos de falla.

2.1.4.1 Desunión fibra matriz, desacoplamiento interfacial o debonding

La desunión entre la fibra y la matriz es un tipo de daño en los materiales compuestos que consiste en el despegue de las fibras respecto de la matriz que las contiene, debido a una fuerza de ligamiento débil entre ellas que produce su separación al exigirle algún esfuerzo al conjunto. Justamente, esta interface entre la fibra y la matriz es un camino de propagación principal de la tensión y la deformación aplicadas externamente [25].

Aunque la escala de la desunión entre la fibra y la matriz es pequeña, induce una concentración de tensiones en la matriz circundante que hace posible el crecimiento de este defecto hasta convertirse en una grieta más grande. Esta es la razón por la que las macro fisuras, como el agrietamiento transversal de la matriz, siempre empiezan con el desacoplamiento interfacial acumulativo [26].

Este es el mecanismo principal de daño para las capas que soportan cargas de corte, y en los laminados de capas cruzadas, este mecanismo es más inestable y se torna muy pronto en agrietamiento transversal [26].

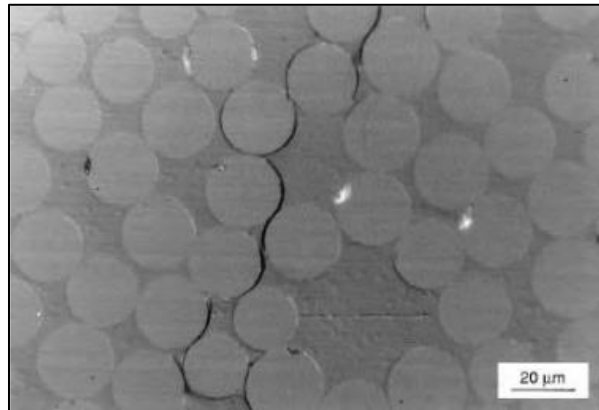


Figura 3: Desunión entre la fibra y la matriz. Ejemplo tomado de la tesis de Zhou [26].

2.1.4.2 Agrietamiento de la matriz

El agrietamiento de la matriz (Figura 4) es un tipo de daño presente en los materiales compuestos que se refiere a la aparición de pequeñas grietas o fisuras en su parte matricial, sin separar entre sí las capas de un laminado. Este término describe la falla cuando la resistencia de la matriz alcanza la tensión máxima, que por lo general es menor que la tensión necesaria para generar delaminaciones y rotura de fibras.

Cuando en un ensayo de tracción uniaxial se produce este daño, se lo suele denominar agrietamiento transversal de la matriz, ya que el mismo se manifiesta como grietas en la dirección perpendicular a la fuerza, observado en las capas orientadas a 90°. Esto es así porque las propiedades en las direcciones transversales son generalmente bajas [26]. Así, estas grietas se inician usualmente en una capa determinada debido a defectos como huecos (vacíos) y desacoplamiento interfacial entre las fibras y la matriz del compuesto. Luego, cuando se aplica carga en la dirección transversal, estas grietas pueden crecer, atravesando el espesor de la capa, y

son capaces de recorrerlas en todo su espesor a medida que avanzan de manera paralela a las fibras [26].

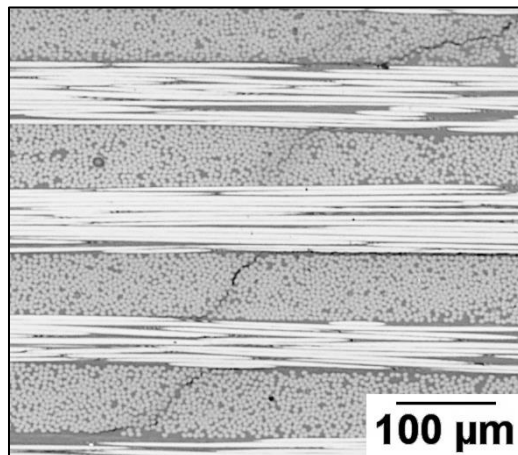


Figura 4: Agrietamiento de la matriz en distintas capas de un laminado bidireccional de CFRP.

2.1.4.3 Delaminación

La delaminación es uno de los patrones de fractura más comúnmente observados en materiales compuestos, consistente en la separación de las capas reforzadas con fibras que se apilan juntas para formar el laminado. La rotura por delaminación consiste en la pérdida de la capacidad de transmisión de tensiones entre las capas del compuesto, debido a que se produce una fractura entre las mismas.

En el caso de los CFRP, la delaminación consiste en la rotura a lo largo del plano que separa las distintas capas, conduciendo a una reducción de la rigidez y la capacidad resistente del compuesto que puede desembocar en su fallo [27]. Las causas más frecuentes de la delaminación son los materiales utilizados y las discontinuidades estructurales, que dan lugar a tensiones interlaminares [28]. En laminados cruzados bajo carga de tracción, generalmente se inicia por una grieta transversal [26].

En definitiva, la delaminación es la separación de las capas y puede verse como una grieta plana que separa la interface entre dos capas adyacentes.

No debe confundirse la desunión fibra matriz con la delaminación, ya que la primera se refiere a dos materiales que dejan de adherirse el uno al otro, simplemente atribuida a la naturaleza del vínculo entre la fibra y la matriz, mientras que la segunda es específica a la separación entre capas de un laminado y suele requerir mayores tensiones para volverse el tipo de falla importante que es.

En la Figura 5 se observa un ejemplo de la delaminación en el borde de una probeta bidireccional de CFRP.

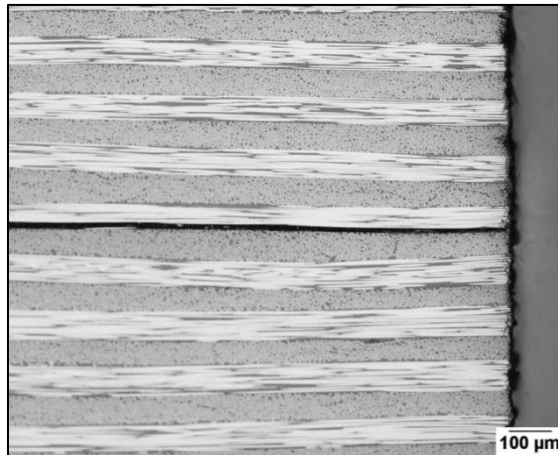


Figura 5: Delaminación en el borde de una probeta bidireccional de CFRP.

2.1.4.5 Rotura de fibras

La rotura de fibras es, como lo indica su nombre, el quiebre de las mismas, debido a que la tensión que sobre ellas actúa resultó ser mayor que su resistencia máxima. Suele ser la última etapa del daño, produciéndose, en general, a cargas mayores que el agrietamiento de la matriz y la delaminación.

En los laminados CFRP, las fibras de carbono suelen soportar la mayor parte de la carga, lo que implica que su falla final generalmente proviene de la rotura de las mismas.

Cuando se aplica una carga de tracción a lo largo de la dirección de la fibra en un material compuesto que contiene capas a 0° , cada una de ellas falla en sus puntos débiles. La concentración de carga en las fibras adyacentes a una fibra rota aumenta la probabilidad de que se rompa una segunda fibra. Tal evento aumentará la probabilidad de roturas adicionales, y así sucesivamente [26], generando un daño en cadena crítico.

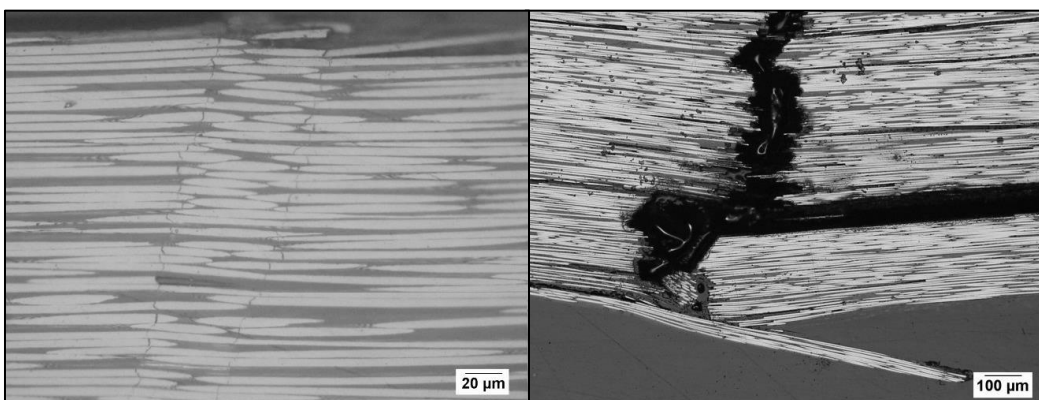


Figura 6: Rotura de fibras en laminados de CFRP, a escala micro (a) y macroscópica (b).

2.1.4.6 Progreso del daño en los CFRP

Cuando un material reforzado con fibras falla, generalmente se debe a una combinación de sus mecanismos de daño. Dado que los materiales compuestos

exhiben muchos mecanismos de acumulación de daños y diferentes modos de falla, los investigadores a lo largo de los años han considerado que es difícil incorporarlos al proceso de predicción de su vida útil [29]. Desde edades muy tempranas en la investigación de los compuestos se ha intentado comprender la forma en que el daño evoluciona y se acumula en estos materiales. Case y Reifsnider [8] explicaron de manera cualitativa cómo los mecanismos de daños y fallas pueden comenzar, interactuar y conducir a la falla final. La Figura 7 resume este proceso en una descripción genérica de alto nivel de acumulación de daños en materiales compuestos bajo casi cualquier tipo de carga de servicio.

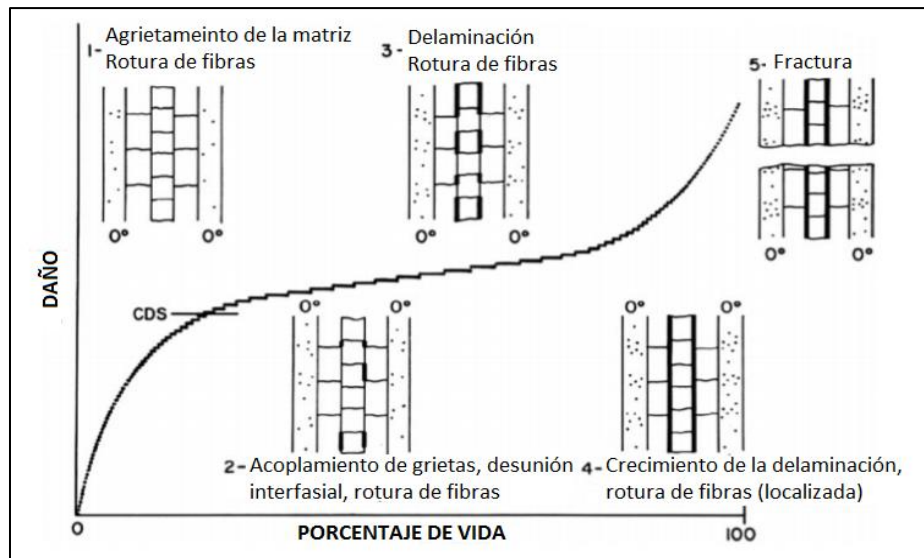


Figura 7: Acumulación del daño durante la vida de un material compuesto. Ejemplo tomado de Case [8].

Aparentemente, es un proceso de degradación multi-estado que se inicia con el agrietamiento transversal de la matriz en las capas que soportan los mayores valores de tensión. Las grietas de la matriz se forman, se saturan en el llamado “Estado de Daño Característico” (o CDS), se propagan y se fusionan para formar separaciones tempranas entre las fibras y la matriz, y, en matrices muy tenaces, conducen a fallas tempranas y localizadas de fibra. Las separaciones y las grietas de la matriz se propagan para formar delaminaciones en las interfaces entre las capas, mientras que los paquetes de fibras comienzan a fallar acelerando con mayor frecuencia el daño inducido en la etapa final de la vida útil del material, hasta llegar a su fractura macroscópica [5].

Este es un proceso de daño descrito de una manera genérica. Durante la carga, la secuencia de los mecanismos de falla depende principalmente de las propiedades de tensión de las fibras y la matriz. En particular, la secuencia precisa de acumulación de daños depende de la secuencia de apilamiento exacta, de las propiedades del material de los constituyentes del compuesto, de los defectos inducidos durante la fabricación, del perfil de carga, las condiciones ambientales, etc. [5].

2.1.4.7 Modos de deslizamiento I, II y III

Los modos de deslizamiento I, II y III son tres formas diferentes de propagación de una fractura distinguidos por los movimientos relativos de las superficies a cada lado de la grieta.

El modo I es el modo de apertura o de tracción, en donde las superficies a cada lado de la grieta se alejan una de la otra (Figura 8a₁ y 8b superior).

El modo II es el modo de deslizamiento o corte, en donde las superficies se deslizan una sobre la otra (Figura 8a₂ y 8b central).

El modo III es el modo de desgarro, en el que las superficies se mueven torciéndose una respecto a la otra (Figura 8a₃ y 8b inferior).

El modo I de fractura interlaminar puede ser considerado el modo vital en la delaminación, porque la energía requerida para su iniciación es más baja que en el caso del modo II o de corte [30].

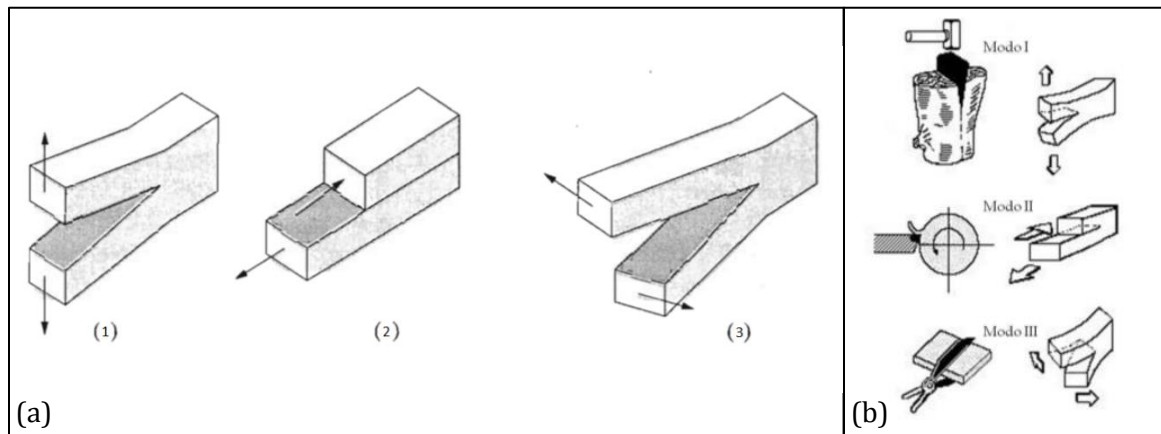


Figura 8: Modos de deslizamiento fundamentales en la propagación de una fractura. (a) Imagen perteneciente a Callister [31]. (b) Imagen perteneciente a Rodríguez Vázquez [28].

2.2 EMISIÓN ACÚSTICA

2.2.1 Generalidades

En la norma ASTM E1316, que corresponde a la terminología para los ensayos no destructivos, la EA está definida como “la clase de fenómeno en el cual ondas elásticas transitorias son generadas por la rápida liberación de energía de fuentes localizadas dentro del material, o las ondas transitorias así generadas” [32]. Tanto las emisiones acústicas, que son pequeños impulsos de vibración (ondas elásticas) emitidos por procesos de daños como el crecimiento de grietas dentro de un material, como el nombre del método de ensayo en el cual se registran y analizan estas emisiones (utilizándose en la investigación de materiales y en la prueba e inspección de estructuras), abarcan lo que se conoce como EA [33].

Es un método análogo a la actividad sísmica registrada por los sismógrafos, aunque en un rango más corto, que se extiende desde unos pocos centímetros en especímenes de laboratorio hasta varios metros en estructuras reales, y en el cual los fenómenos de emisión ocurren con amplitudes muy pequeñas y a frecuencias situadas en el rango de

los ultrasonidos, desde un poco más allá de la región audible hasta unos pocos MHz. Las ondas emitidas se registran mediante transductores que se fijan en la superficie del componente bajo prueba. Estos son generalmente piezoeléctricos y transforman la presión que se siente en su superficie a señales eléctricas. Luego, la onda se transforma en una forma de onda eléctrica, normalmente pre amplificándola, y se digitaliza en una placa de adquisición de datos.

Históricamente, es un fenómeno bien conocido que muchos materiales, como la roca y la madera, emiten sonidos al romperse. Los antiguos herreros del estaño conocían el fenómeno, y el primer uso práctico documentado de EA es el de los alfareros que estaban atentos a las grietas durante el proceso de secado [34]. El desarrollo de la emisión acústica moderna comenzó con la tesis doctoral de Joseph Kaiser en 1950 en la Universidad de Munich [35]. Muy pronto, en los años 60, se desarrolló la ubicación de la fuente basada en la diferencia de tiempo de llegada entre los sensores [36]. El desarrollo paralelo de la emisión acústica tuvo lugar en la Unión Soviética [37], y la caracterización del daño utilizando EA puede ser rastreada hasta 1971 con los trabajos de Mehan y Mullin [38] y Stephens y Pollock [39]. Los primeros usos del análisis de emisión acústica incluyen también las ondas elásticas producidas por los terremotos [40]. En la actualidad, la EA se utiliza por lo general en una serie de industrias y aplicaciones para caracterizar procesos de daño, predecir la vida útil de los componentes y localizar posibles defectos.

Siendo por definición el fenómeno de generación de ondas de presión o tensión durante procesos dinámicos en materiales [40], la EA es generada por el material en sí, y, por lo tanto, debido a su naturaleza, la EA es un método de ensayo pasivo [15]. En principio, la EA puede generarse por cualquier mecanismo que convierta alguna forma de energía en energía elástica (existiendo consecuentemente una fuente de EA), que se propagará por un medio. Esta energía involucrada por la fuente de ondas puede ser: mecánica, electromagnética, química, térmica, u otras. Entonces, una fuente de EA convierte las energías mencionadas en ondas elásticas. Esta liberación de energía ocurre de manera estocástica [41, 42], en un proceso que se denomina Evento de EA [43]. A su vez, la fuente de EA depende del tipo de material. Así, en los metales, las fuentes pueden ser movimientos de dislocación, grietas, fracturas e incluso corrosión. En el hormigón, por ejemplo, las macro fisuras y las micro fisuras, así como el desprendimiento o el movimiento del refuerzo, pueden causar emisiones, y para los materiales compuestos, la EA proviene de la desunión de la matriz de las fibras, del agrietamiento de la matriz, la delaminación, la rotura de fibras y la extracción de las fibras [44]. Si bien el crecimiento de grietas en los materiales es una de las principales fuentes de EA, la EA no se limita sólo a esto: otros fenómenos como la fricción y las fugas en sistemas hidráulicos como tuberías y válvulas también producen sonidos similares en el mismo rango de frecuencias que la EA [45]. Además de las fuentes internas de EA, el ruido externo (ruido de fondo), como el frotamiento mecánico o el viento son capaces de crear ondas elásticas que pueden interferir con los datos genuinos [46].

La naturaleza de las ondas medidas en la EA es idéntica a las ondas utilizadas en el método de END del US. La diferencia fundamental entre la EA y el US es, justamente, la ausencia de excitación de onda externa, ya que las emisiones se originan a partir de los eventos de fisuración dentro del material. Además, en la EA el material debe ser

estresado para producir eventos de agrietamiento activo, a diferencia de los ultrasonidos que no requieren estrés mecánico en el material [40].

La EA se ha utilizado para monitorear la condición estructural y para la caracterización del daño de prácticamente todo tipo de materiales y sistemas [2-4], pudiéndose dividir sus aplicaciones en las siguientes áreas: investigación de materiales, inspección y prueba de componentes y estructuras, monitoreo continuo de estructuras y control de calidad de la producción.

En la investigación de materiales, la EA se ha utilizado para estudiar la transformación de fase martensítica, el agrietamiento por corrosión bajo tensión, la distinción entre el agrietamiento intra e inter granular, etc. [47], aplicándose en condiciones de laboratorio para monitorear el proceso de fractura de materiales de ingeniería y comprender su comportamiento al ser sometidos a estrés u otros factores de degradación. Para la inspección y los ensayos, las aplicaciones típicas incluyen recipientes a presión, tanques de almacenamiento y estructuras aeroespaciales [34]. En el caso de la monitorización continua de estructuras, la EA se ha aplicado, por ejemplo, a puentes de hormigón pretensado [48], y también se utiliza en el petróleo y el gas, la industria nuclear, o para garantizar la calidad de las soldaduras, por citar algunos.

2.2.2 Ventajas y desventajas de la EA

La EA es un método muy poderoso debido a su vínculo entre los datos recogidos y la mecánica de la fractura, lo que lo convierte en una herramienta muy útil desde el punto de vista de la ingeniería [13]. El análisis con EA es uno de los métodos de monitoreo más efectivos, con gran sensibilidad y capacidad para la detección rápida y temprana de fallas [49]. El monitoreo con EA puede proporcionar confianza a la hora de evaluar la integridad de una estructura o componente, reduciendo la inspección y el mantenimiento innecesarios [50], ya que puede detectar el comienzo del daño y su evolución, así como su perfil en tiempo real. Tanto el inicio como la acumulación del daño, así como los procesos de mecánica de fractura, pueden ser investigados en detalle con el análisis por EA [51].

Una ventaja del método de EA, en comparación con otros métodos END, es que los procesos de daños en los materiales que se están probando se pueden observar durante todo el historial de la carga, sin perturbar la muestra. Las técnicas de análisis por US, por ejemplo, deben aplicarse junto con técnicas de escaneo para detectar un defecto, y por lo general, requieren detener la carga de una estructura. En contraste, los estudios de EA requieren, bajo condiciones favorables, que sólo unos pocos sensores puedan monitorear la actividad de EA en una estructura, siempre que haya señales suficientemente fuertes para cruzar un umbral llamado trigger level, o nivel de activación. Los sensores pueden fijarse a la superficie de la muestra durante la prueba y no deben moverse para escanear toda la estructura punto por punto. El acceso a ambos lados de un objeto, que es necesario para todos los métodos de transmisión, tampoco es necesario en la EA [3].

Además, como ya se mencionó, el monitoreo con EA puede ser aplicado on-line durante el test, aunque un análisis completo puede requerir el procesamiento de datos posterior al ensayo [51]. En los ensayos de fatiga, por ejemplo, las técnicas

basadas en la rigidez no son adecuadas para la detección temprana del daño en los CFRP debido a que los cambios micro estructurales en el material, como las grietas transversales, no afectan esta característica hasta que el daño acumulado ya es mayor, y el riesgo de una falla catastrófica sin previo aviso se vuelve inaceptable, por lo que la EA resulta ser mucho más eficaz [52]. Las ventajas de ensayar y analizar materiales compuestos con el método de EA son los datos en tiempo real, la alta sensibilidad, y la sensibilidad a cualquier proceso o mecanismo que genere señales de EA [30], pudiendo resaltar los mecanismos fundamentales de daño y fractura en estos materiales [13].

A pesar de estas ventajas, es difícil sacar conclusiones más exactas sobre un defecto dada la información que brinda la EA. La razón de esto es que la señal se verá afectada por las funciones de transferencia en frecuencia de la fuente, el medio, el sensor y la electrónica antes de que pueda analizarse [47]. En otras palabras, para contar con mayor precisión lo que sucedió en la fuente, se debe tener conocimiento de todas estas funciones de transferencia [45].

Evaluar las señales y discriminar consecuentemente los mecanismos de daño es el mayor desafío del método de la EA [30]. Las firmas acústicas de los eventos de daño están más bien dispersas, y dependen del sistema de EA, en partículas de los sensores. En consecuencia, no hay una firma universal para los eventos de daño. Uno o varios parámetros en una carga de tensión no son válidos para estructuras complejas y diferentes cargas aplicadas, por lo que se suele optar por los parámetros multivariantes para discriminar los mecanismos de daño [53]. Adicionalmente, si las características de la EA están afectadas significativamente por los efectos múltiples de la propagación de ondas, como las reflexiones, la atenuación, la conversión de modos o la dispersión, la interpretación de los resultados se vuelve difícil (para este propósito, se han propuesto técnicas más refinadas incluyendo el análisis de Fourier, la transformada Wavelets, el reconocimiento de patrones (Pattern Recognition) o las redes neuronales) [20]. Justamente, en grandes elementos o estructuras, la atenuación y la precisión en la localización de las fuentes constituyen los factores más limitantes en las pruebas de mecánica de fractura sobre estos elementos [51].

Los datos de la EA son, en general, complejos, y en los materiales compuestos, el análisis gráfico convencional no es suficiente para proveer argumentos que discriminen diferentes mecanismos involucrados en su comportamiento frente a sollicitaciones mecánicas. Aquí, las técnicas estadísticas automatizadas pueden ayudar a identificar la correlación entre los datos [54].

Otra desventaja del método de la EA es que una prueba particular no es perfectamente reproducible debido a la naturaleza de la fuente de la señal, como por ejemplo la formación repentina y a veces aleatoria de una grieta. A pesar de que especímenes de la misma forma y con las mismas propiedades del material pueden causar actividades de EA similares durante la carga, no siempre es el caso. Materiales que tengan inhomogeneidades dispersas de un tamaño determinado, como el hormigón, no darán resultados de EA similares si la longitud de onda de las señales es parecida a las dimensiones de las heterogeneidades. Esta es una de las razones por las que es útil comparar los resultados de los ensayos de EA con otros métodos, por ejemplo la inspección visual o los rayos X [3].

Las señales utilizadas en la EA (en particular las que se utilizan como precursoras de una falla) son, por lo general, varios órdenes de magnitud menores que aquellas utilizadas en el US. Esto requiere el uso de sensores muy sensitivos, así como también pre amplificadores y amplificadores confiables. Todo esto puede traer problemas relacionados con la influencia del ruido ambiente, la atenuación de las señales y la consecuente baja relación señal ruido [3]. Respecto al ruido de fondo, comúnmente se minimiza con el establecimiento de umbrales de evaluación y prueba apropiados [15], y la atenuación se tiene en cuenta al colocar los sensores lo suficientemente cerca entre sí para hacer despreciable el efecto.

Resumiendo, las principales ventajas del método de END de la EA son que puede ser usado en todas las etapas de las pruebas (antes y durante el servicio), es menos sensible a la geometría del espécimen, menos intrusivo y muy abarcativo, se puede realizar en tiempo real y de forma remota, y no se ve tan limitado por la anisotropía del material. Las principales desventajas son la repetitividad (cada prueba será diferente), la atenuación, el ruido, y que conviene conocer el historial de carga de la estructura para un mejor desempeño [54].

2.2.3 Propagación de las ondas elásticas

El caso más simple de propagación de una onda es el que se produce en un medio infinito, que no tiene contornos. Sólo dos tipos de ondas se pueden propagar en un medio de tales características: las ondas longitudinales o dilatacionales (P) y las transversales o distorsionales (S). Cuando las ondas P se propagan por el medio sólido, un pequeño cubo imaginario dentro de él, cambia su volumen, pero los ángulos de las esquinas del cubo permanecen iguales sin cambiar su valor de 90°. En cambio, con las ondas S, su volumen permanece constante pero sí cambian los ángulos de sus esquinas.

La velocidad de las ondas longitudinales V_L se calcula como:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young (una constante que depende del material), σ es el cociente de Poisson (un parámetro adimensional comprendido entre 0 y 0,5, que también depende del material), y ρ es la densidad del sólido.

La velocidad de las ondas transversales V_T es:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (2)$$

De las Ecuaciones 1 y 2, se puede ver que $V_L/V_T > 1$

Cuando se limita el medio con una superficie aparece además de las dos anteriores, un tercer tipo de ondas, las ondas de superficie o de Rayleigh (Figura 11).

Si el medio está limitado por dos superficies paralelas, separadas por una distancia del orden de la longitud de onda de la perturbación, entonces aparecen las ondas de Lamb u ondas de placas en sus modos simétricos (S_i) y antisimétricos (A_i). Estas ondas son dispersivas, es decir, cada frecuencia se propaga con diferente velocidad, y sus diferentes fases hacen que las componentes se sumen para formar una onda distinta. El problema analítico es mucho más difícil de resolver. Generalmente sus velocidades están en el rango comprendido entre la velocidad de las ondas longitudinales y transversales para ese material.

La dificultad en identificar la velocidad de forma no ambigua, produce problemas en las técnicas usadas para localizar las fuentes de EA.

Resumiendo: Si el medio es infinito, homogéneo e isótropo, existen ondas transversales y longitudinales (Figura 9 y Figura 10); si el medio es semi infinito, aparecen las ondas superficiales, como las ondas de Rayleigh (Figura 11); y si el medio es finito y delgado respecto a la longitud de onda, se generan las ondas de Lamb (Figura 12 y Figura 13).

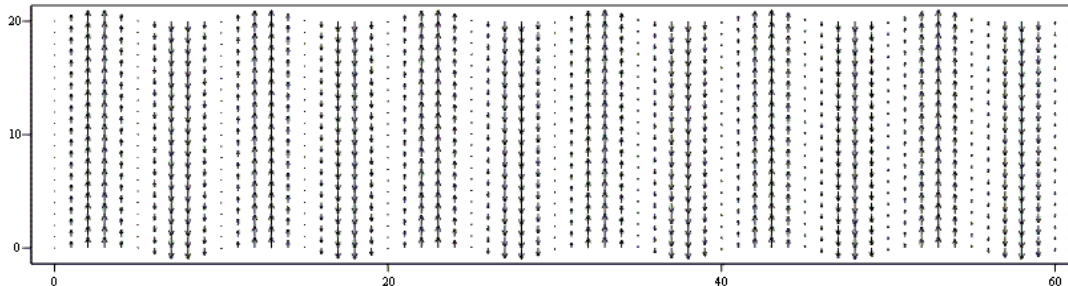


Figura 9: Ondas transversales (S) en un medio infinito, homogéneo e isótropo.

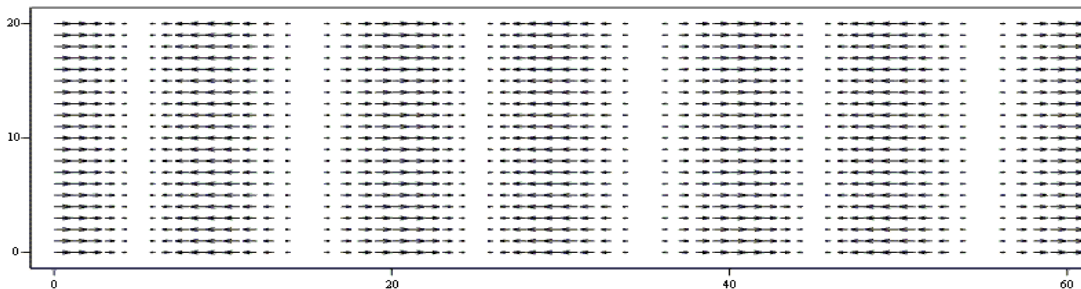


Figura 10: Ondas longitudinales (P) en un medio infinito, homogéneo e isótropo.

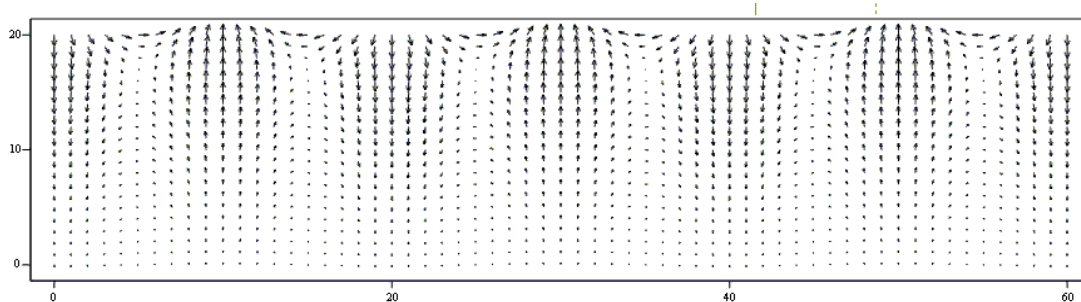


Figura 11: Ondas Rayleigh en un medio semi infinito.

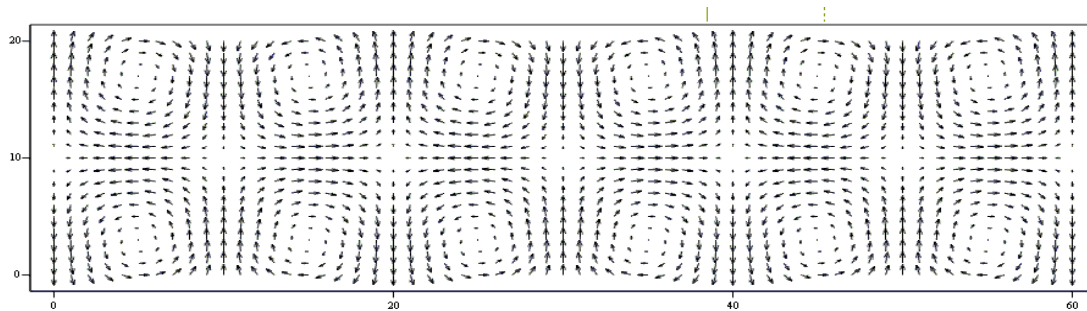


Figura 12: Ondas Lamb simétricas (modo S0).

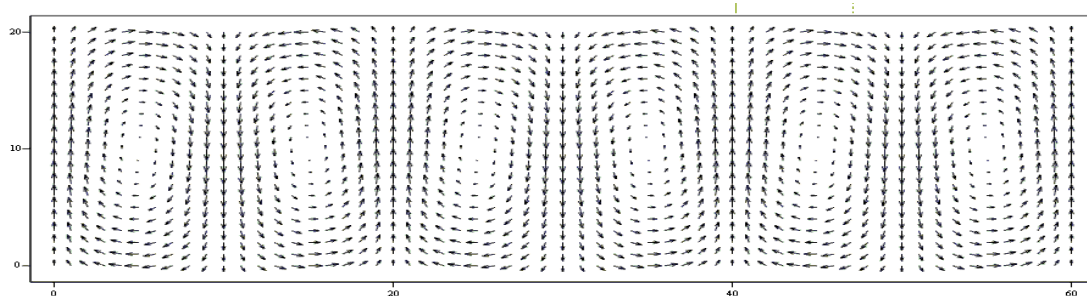


Figura 13: Ondas Lamb antisimétricas (modo A0).

En la EA de placas (espesores delgados y frecuencias de hasta 500 kHz), las ondas se propagan en los dos modos principales S0 y A0, separados en el tiempo debido a sus velocidades diferentes (Figura 14). Sin embargo, las reflexiones y otros efectos físicos como la dispersión, la atenuación y las interferencias constructivas y destructivas hacen que separar los modos sea un problema en las aplicaciones reales [20].

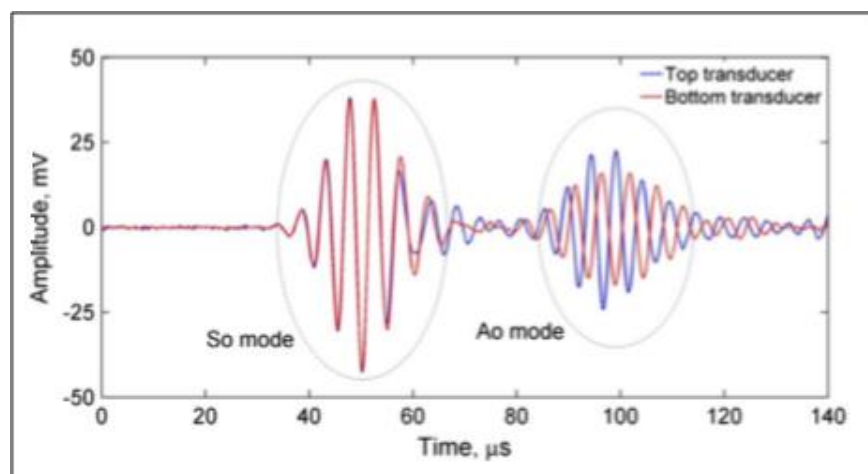


Figura 14: Separación en el tiempo de los modos S0 y A0 debido a la diferencia en sus velocidades de propagación. Imagen tomada de Asamene [55].

2.2.4 Eventos fuera del plano (OP) y eventos dentro del plano (IP)

En la propagación de ondas en placas y cupones delgados, los eventos fuera del plano (Outside the Plane) son los eventos que producen desplazamientos de

partículas perpendiculares al plano medio de la placa (es decir, saliendo de la misma), y corresponden al desplazamiento predominante en el modo flexural o A0 de las ondas Lamb.

Por otra parte, los eventos dentro del plano (Inside the Plane) son los eventos que producen desplazamientos de partículas paralelos al plano medio de una placa (es decir, a lo largo de su extensión) y que son simétricos respecto del mismo, correspondiéndose al movimiento predominante producido por el modo extensional o S0 de las ondas de Lamb.

Ejemplos de eventos OP son los producidos por el daño causado por impactos o la delaminación en los compuestos, mientras que el agrietamiento por fatiga en los metales y el agrietamiento de la matriz en las capas centrales de un laminado de material compuesto son ejemplos de eventos IP [20,56].

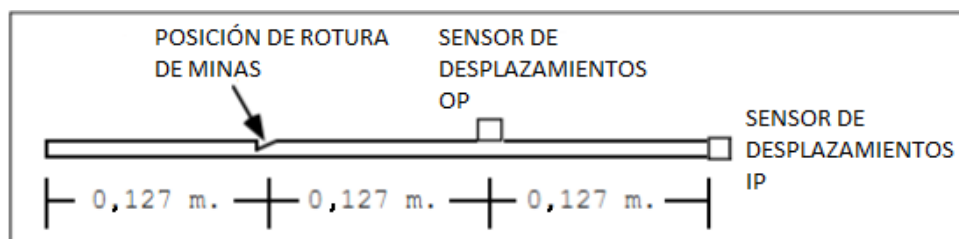


Figura 15: Vista en corte de una placa ilustrando las posiciones de los sensores para medir eventos IP y OP. Imagen tomada de Prosser [2].

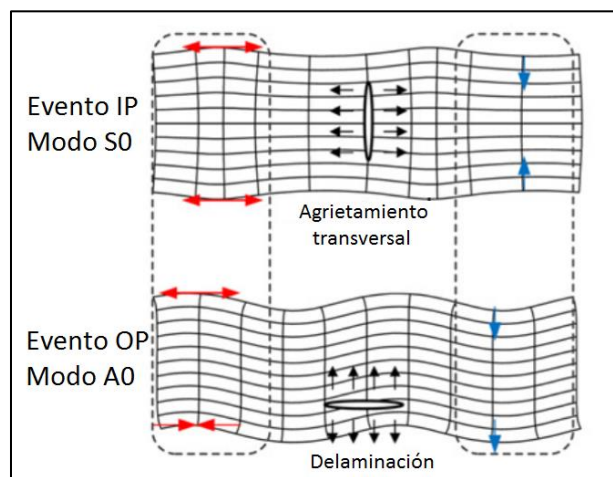


Figura 16: Ejemplos de eventos IP y OP. Imagen tomada de Wu [57].

2.2.5 Efecto Kaiser

En la mayoría de los metales, al aplicarles una tensión, se genera una respuesta irreversible en forma de EA, que se manifiesta cuando el material no ha sido cargado previamente o cuando se supera el valor máximo de la carga anteriormente aplicada. De esta manera, cuando la EA no se presenta hasta después de haber superado la carga máxima previamente aplicada, se habla del efecto Kaiser. Este efecto "memoria" depende del material ensayado, y su duración está determinada según las características de recuperación a temperatura ambiente del mismo.

A pesar de que el efecto Kaiser implica que en la mayoría de los casos la EA sea un proceso irreversible e irreplicable, tiene la ventaja de que con él es posible evaluar la máxima carga a la que estuvo sometido un material o una estructura. Así, la EA durante una prueba de carga es una medida del daño producido durante el precedente periodo de trabajo. De esta forma, la aplicación práctica del efecto Kaiser se realiza a través de incrementos sucesivos de carga.

El efecto Kaiser falla en situaciones donde la deformación está controlada por mecanismos dependientes del tiempo (creep). En materiales compuestos y hasta en metálicos, en los procesos mecánicos puede ocurrir fricción entre superficies libres en regiones dañadas (por ejemplo fisuras) lo que puede ser una importante fuente de EA. Tales fuentes no coinciden con el efecto Kaiser pero son útiles en la búsqueda de daño y discontinuidades [43].

2.2.6 Efecto Felicity

Existen materiales, como los compuestos, que no cumplen el efecto Kaiser y tienen un comportamiento denominado efecto Felicity. Este efecto implica la aparición de eventos de EA antes de alcanzarse la carga previa aplicada en el material. Un ejemplo de la falla del efecto Kaiser y la aparición del Felicity está dado cuando se estudia el comportamiento a la carga de los CFRP cuando están deteriorados o próximos a la rotura.

Una importante aplicación práctica del efecto Felicity ha sido la detección de daños en recipientes o tanques de almacenamiento de fibra de vidrio [43].

El efecto Felicity está determinado por el cociente Felicity, que se define como:

$$F = (\text{Tensión de reinicio de la EA}) / (\text{máx. tensión previa}) \quad (3)$$

Este coeficiente puede ser usado para indicar la severidad de la discontinuidad y realizar comparaciones, y se ha relacionado con la resistencia residual de los materiales compuestos [4].

2.2.7 Señales de EA

El proceso físico de la emisión de ondas elásticas es denominado evento de EA. Luego, un evento de EA podrá observarse como “hits” o golpes en cada uno de los canales del equipo. Cada vez que una onda elástica llegue a un sensor y tenga una amplitud mayor que un umbral determinado se define que se ha registrado un “hit” o golpe en ese canal. Las señales eléctricas o de EA son pre amplificadas, filtradas, detectadas, amplificadas y procesadas para ser estudiadas de diversas maneras con el fin de extraer información relevante de los procesos y/o del material [43].

Básicamente las señales de EA se clasifican en dos tipos: las señales tipo explosión o “burst”, y las señales de tipo continuo (Figura 17). Las primeras son pulsos transitorios tipo paquete de mayor o menor duración según el fenómeno que las produzca y las características del medio en el cual se propagan; estas tienen un comienzo y un final. Las otras, como su nombre lo indica, no tienen comienzo ni final. En los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales. Como ejemplo de cada tipo de señales se puede mencionar a la deformación plástica o

la fricción como fuentes de señales de EA tipo continua, mientras que la fisuración, la corrosión o las transformaciones martensíticas pueden dar señales tipo burst.

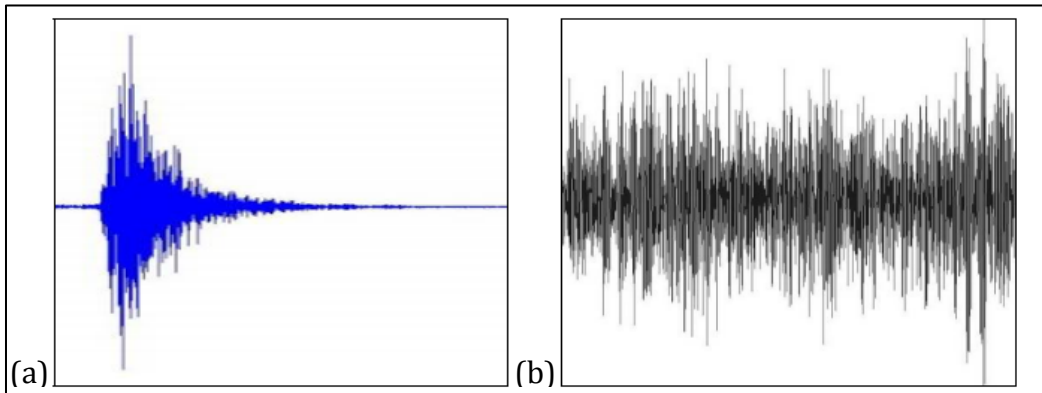


Figura 17: Señales de EA amplitud vs. tiempo: (a) Tipo explosión (burst); (b) tipo continua.

2.2.8 Parámetros de EA

Una señal de EA se representa en un gráfico de voltaje en función del tiempo o del número de muestras. A partir de esta señal, se pueden medir y calcular varios parámetros, detallados a continuación en esta sección del capítulo. Para ayudar a visualizarlos, en la Figura 18 se simboliza una forma de onda idealizada del tipo burst representativa de un hit de EA típico junto con algunos de estos parámetros.

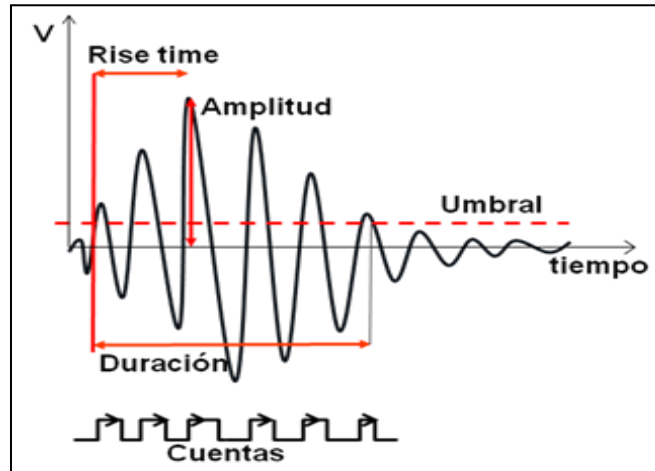


Figura 18: Algunos parámetros obtenidos a partir de la forma de onda de una señal.

Los parámetros característicos de la EA están definidos generalmente para señales del tipo explosión (Figura 17a), y algunos pueden extenderse a las señales continuas (Figura 17b). A continuación se definen los parámetros más importantes:

Umbral: Es el nivel de tensión que debe sobrepasarse para que una señal de EA sea detectada y reconocida como tal.

Se lo expresa en decibeles (dB).

Tiempo de ocurrencia (hit time): Es el tiempo al cual se considera que comienza el hit. Esto ocurre cuando la señal supera el umbral, por lo cual dependerá de su valor.

Su unidad es el segundo (s).

Amplitud: Es el valor máximo de la amplitud de la señal de EA, tanto si este ocurre en el lado positivo como negativo de la forma de onda.

Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y propiedades del material. En general se expresa en dB_{EA} dado que la variación en mV es de varios órdenes de magnitud. Ha sido uno de los primeros parámetros utilizados para estudiar los fenómenos de EA [58,59]. También este parámetro es uno de los pocos útiles en la descripción de señales del tipo continuo. No depende del umbral (si lo supera).

La definición de los dB de EA, llamados dB_{EA} , es particular para este método, y está referida a una señal de $1\mu V$ en el sensor de EA. Un dB_{EA} se define como:

$$dB_{EA} = 20 \log \left(\frac{V_s}{1\mu V} \right) - (\text{Ganancia del pre amplificador en dB}) \quad (4)$$

donde V_s es el voltaje medido a la salida del sensor.

A fines de simplificar la escritura, los dB_{EA} se expresarán como dB a lo largo de esta tesis.

Duración: Es el tiempo transcurrido desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del espécimen, de las características del sensor utilizado y del valor del umbral. También depende de la reverberancia del material.

Sus unidades serán microsegundos (ms).

Rise time (tiempo de subida): Es el tiempo desde que la señal cruza el umbral hasta que alcanza su amplitud máxima. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende del umbral. Da una idea del tiempo de actividad de la fuente [60]. Puede ser útil para filtrar ruido. Tiene estrecha relación con el período de actividad de la fuente.

Sus unidades serán micro segundos (μs).

Número de cuentas: Es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral. Históricamente fue uno de los primeros parámetros de EA por su facilidad de implementación electrónica. Depende del umbral y está relacionado con la amplitud.

Energía MARSE: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificadas (Measured Area under Rectified Signal Envelope). Esta parametrización no depende del umbral pero si de la amplitud y la duración de la señal [61, 62]. La energía MARSE es ampliamente utilizada en la implementación de la EA como método de END debido a sus ventajas particulares.

Las unidades de este parámetro registrado por la placa de adquisición de datos utilizada son $\mu V.s/cuenta$, o, de forma simplificada, cuentas de energía.

Valor cuadrático medio o RMS: Es una medida estadística de la magnitud del voltaje, que es variable, relacionándolo con la energía contenida en la señal.

El valor RMS se calcula mediante la ecuación:

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt\right)} \quad (5)$$

donde V es el voltaje medido, y T es periodo o tiempo que dura la señal.

Dada la aleatoriedad de la ocurrencia de la EA, para describir una emisión no periódica, con un amplio contenido de frecuencias, no se puede recurrir a una función matemática determinista, sino que se debe utilizar algún parámetro como el RMS que pueda relacionarse con la energía contenida en la señal.

Por definición del RMS, la energía contenida en la señal puede estimarse como:

$$\Delta E \propto (RMS)^2 \Delta t \quad (6)$$

donde $E\Delta$ es la energía involucrada en el tiempo $t\Delta$.

Otras ventajas de utilizar el RMS son:

- El suavizado de la señal de EA permitiendo encontrar alguna función analítica relacionada.
- La cancelación de la dependencia de la sensibilidad del resultado de la medición respecto del nivel del umbral,
- La reducción de la sensibilidad a los pequeños cambios en la ganancia del sistema electrónico o en el acoplamiento del transductor.

Su unidad es el Volt (V).

Energía absoluta: Se define como:

$$E_e = \frac{1}{R} \int [V(t)]^2 dt \quad (7)$$

donde V es el voltaje a la salida del sensor y R es una resistencia de referencia (10 $k\Omega$).

Los parámetros referidos al voltaje, energía o potencia de la señal en general son valores relativos y no absolutos, ya que no se han tenido en cuenta en la medición ni las pérdidas en el transductor ni la atenuación del material.

Sus unidades serán atto Joules (aJ).

Frecuencia pico (peak frequency): Se define como el punto en el espectro de potencia en el cual la amplitud pico ocurre. Para calcularlo, el software asociado realiza un análisis FFT en tiempo real de la forma de onda del hit, y devuelve la frecuencia en la cual aparece la mayor magnitud.

La resolución y el rango de este parámetro dependen de la frecuencia de muestreo y de la longitud de la forma de onda.

Su unidad es el Hercio, o Hertz (Hz).

Frecuencia centroide (frequency centroid): También conocido como el primer momento de inercia, resulta de realizar un análisis FFT en tiempo real de la forma de onda del hit y llevar a cabo el siguiente cálculo sobre cada elemento de la FFT:

$$\text{Frecuencia centroide} = \frac{\sum(\text{magnitud} * f)}{\sum(\text{magnitud})} \quad (8)$$

donde f es la frecuencia. Este parámetro da una idea de la frecuencia promedio que se generó en todo el hit.

La resolución y el rango de este parámetro dependen de la frecuencia de muestreo y de la longitud de la forma de onda.

Su unidad es el Hercio, o Hertz (Hz).

Parámetro RA (valor RA o RA value): Este parámetro secundario se calcula como el cociente entre el rise time y la amplitud. Este parámetro puede ser útil para clasificar los tipos de fisuras.

Sus unidades son $\mu\text{s}/\text{dB}$.

La amplitud, la duración, las cuentas y la energía son características temporales de la señal, mientras que la frecuencia pico y la frecuencia centroide son características frecuenciales [63].

Comúnmente se utilizan los siguientes parámetros auxiliares para la detección de los hits de EA:

HDT (Hit Definition Time): Especifica el tiempo máximo entre los cruces del umbral; es decir, si no ocurre ningún cruce durante este tiempo, entonces el hit ha finalizado.

Si el HDT está configurado demasiado alto, el sistema puede considerar dos o más hits como uno. Si el HDT se configura demasiado bajo, entonces el sistema puede no capturar el hit por completo y posiblemente tratar un golpe como múltiples.

HLT (Hit Lockout Time): Especifica el tiempo que debe pasar después de que haya finalizado un hit antes de que se pueda detectar uno nuevo.

Si el HLT está configurado demasiado alto, entonces el sistema puede no capturar el próximo hit, y si está configurado demasiado bajo, entonces el sistema puede capturar reflexiones y componentes tardíos de la EA tratándolos como hits.

PDT (Peak Definition Time): Especifica el tiempo permitido, después de que se ha detectado un golpe, para determinar el valor pico máximo.

Si el PDT se configura demasiado alto, es más probable que se produzcan mediciones falsas del valor máximo. Por esta razón se recomienda que el PDT se configure lo más bajo posible; sin embargo, se debe tener cuidado de no establecerlo demasiado bajo, ya que puede provocar que no se identifique el pico verdadero.

La Figura 19 muestra un ejemplo de estos parámetros junto con una señal de EA.

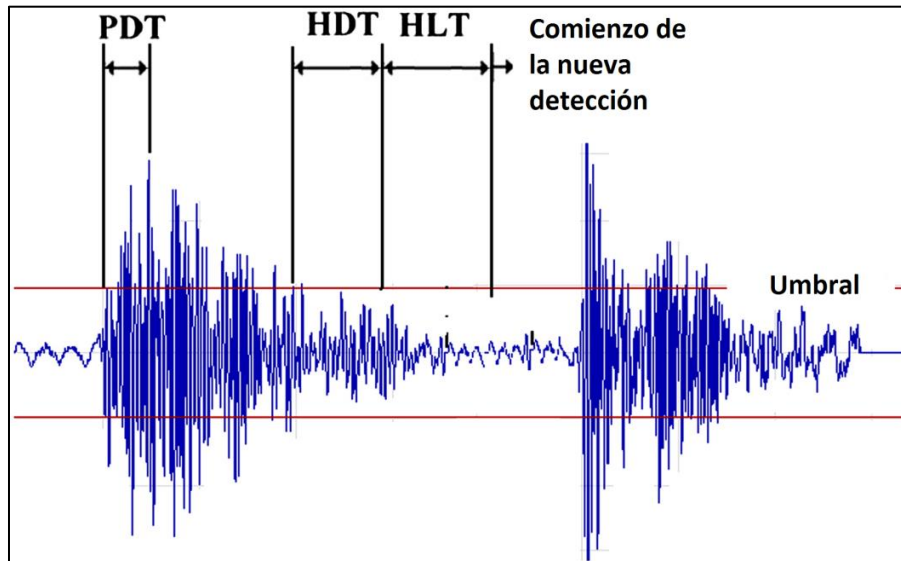


Figura 19: Esquema de los parámetros utilizados para la detección de los hits de EA.

2.4 ENSAYO DE FLEXIÓN DE VIGA CORTA

El ensayo de flexión de viga corta (o SBS por sus siglas en inglés (Short Beam Strength)), es un tipo particular de ensayo de flexión en tres puntos que tiene como objetivo principal determinar la cohesión entre las distintas capas de un material compuesto, obteniendo como resultado el parámetro SBS, que se asemeja a una tensión de corte desarrollada en el plano medio de un espécimen rectangular pequeño, cuando se observa claramente una falla inter laminar en el mismo. Este parámetro da una idea de esta cohesión y permite hacer comparaciones entre pruebas de materiales compuestos y similares, previendo que las fallas ocurran consistentemente en el mismo modo.

Los detalles de este ensayo están determinados por la norma ASTM D 2344-00 [64], y, a grandes rasgos, consiste en realizar un esfuerzo de compresión con una nariz de carga cilíndrica sobre una probeta estandarizada que descansa sobre dos apoyos, generando una flexión que le induce ciertos daños dependiendo de su resistencia (Figura 20). Esto puede realizarse tanto para probetas planas como curvas, a una velocidad de movimiento constante del cabezal de 1 mm/min.

Este tipo de ensayo se utiliza para la determinación de tensiones de corte interlaminar a través del espesor en materiales compuestos, evaluando las características interfaciales, y provee información acerca de la calidad de adhesión

entre la fibra y la matriz de los mismos. Al ser un tipo de ensayo de flexión en tres puntos, el momento de doblez máximo se ubica en la mitad de la probeta, lo que hace que la tensión de flexión máxima esté localizada directamente debajo de la nariz central que aplica la fuerza. Como consecuencia, la presencia de las fuerzas de corte verticales se distribuye sobre toda la viga, excepto justo en la línea debajo del punto medio de aplicación de la fuerza [65].

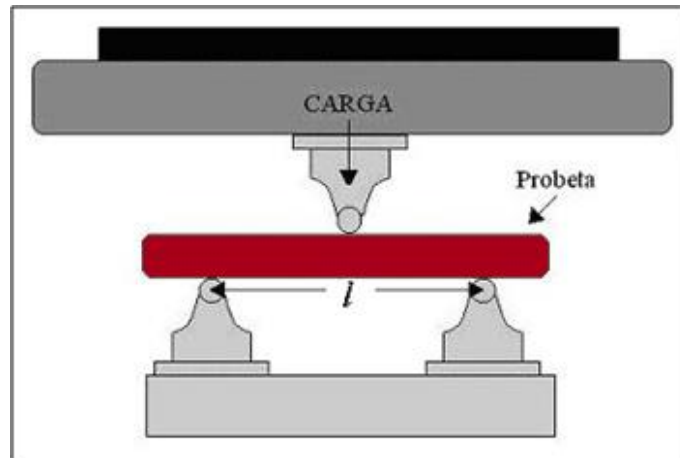


Figura 20: Esquema de un ensayo de flexión de viga corta.

En la Figura 21 se muestran los modos de falla típicos que se producen durante este ensayo.

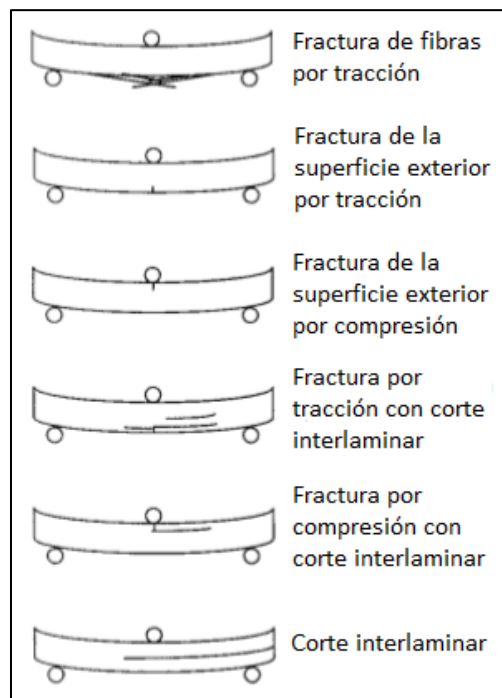


Figura 21: Esquema de los posibles modos de falla en los ensayos de flexión. Imagen tomada de Hodgkinson [17].

A mayor separación entre puntos de apoyo, debería aparecer más corte interlaminar.

Cuando se combina con la EA, este ensayo exhibirá los modos de daño de la probeta en las señales registradas por los sensores.

2.5 RESUMEN DE NORMAS

La norma ASTM D 2344 [64] existe desde 1965, y fue revisada en el año 2000. Su alcance se limita a vigas cortas de materiales compuestos reforzados con fibras de alto módulo, de entre 2 y 6 mm de espesor. El principal parámetro que se calcula siguiendo los procedimientos de ensayo que se describen en ella es el Short Beam Strength, o SBS, dado por la siguiente ecuación:

$$SBS = 0,75 * \frac{P_{max}}{b*h} \quad (9)$$

donde *SBS* es el Short Beam Strength, expresado en MPa, P_{max} es la carga máxima, en N, *b* es el ancho de la probeta y *h* su espesor, ambos en mm.

A su vez, las dimensiones de los especímenes recomendadas son las siguientes:

- Espesor: entre 2 y 6 mm.
- Ancho: 2 veces el espesor.
- Largo: 6 veces el espesor.

Estas medidas se deben medir en la sección media de cada dimensión. Una probeta rectangular típica de 3 mm de espesor, por lo tanto, tendrá una longitud de 18 mm y un ancho de 6 mm.

Existe también la posibilidad de ensayar especímenes curvos, para los cuales el ángulo de apertura entre sus extremos no debe superar los 30°, siendo el valor nominal 28,4°.

El método de prueba consiste en colocar los especímenes centrados, descansando sobre dos apoyos cilíndricos de 3 mm de diámetro que permitan el movimiento lateral, y solicitarlos en flexión por medio de una nariz de carga también cilíndrica de 6 mm de diámetro, a una velocidad de 1 mm/min con movimiento del cabezal constante. La separación entre puntos de apoyo debe ser de 4 veces el espesor $\pm 0,3$ mm, y la nariz y los soportes deben sobrepasar el ancho de la probeta en al menos 2 mm de cada lado. A su vez, cada lado del espécimen debe sobresalir del soporte al menos su espesor. En el caso de ser un espécimen curvo, los puntos de apoyo son reemplazados por dos placas metálicas separadas entre sí 12 mm y que permitan el deslizamiento libre de la probeta.

La carga se debe aplicar hasta que ocurra alguna de las siguientes condiciones: una caída de carga del 30%; fractura de la probeta en dos partes; o cuando el recorrido del cabezal excede el espesor nominal de la probeta. La cantidad de especímenes mínima debe ser 5, a menos que se puedan obtener resultados válidos con menos ensayos,

como en el caso de un experimento diseñado. El ambiente de prueba no debe tener variaciones de temperatura mayores a ± 3 °C y de humedad mayores a ± 3 %.

Además de registrar la carga en función del desplazamiento del cabezal, se calcula el SBS según la Ecuación 9 y el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos según las Ecuaciones 10, 11 y 12:

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i)/n \quad (10)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n x^2 - n(\bar{x})^2)/(n - 1)} \quad (11)$$

$$CV = 100 * S_{n-1}/\bar{x} \quad (12)$$

donde \bar{x} es el promedio de la muestra; X_i es la propiedad medida; n es la cantidad de especímenes; S_{n-1} es la desviación estándar; y CV es el coeficiente de variación de los datos, expresado en %.

Los modos de falla típicos según la norma se muestran en la Figura 22.

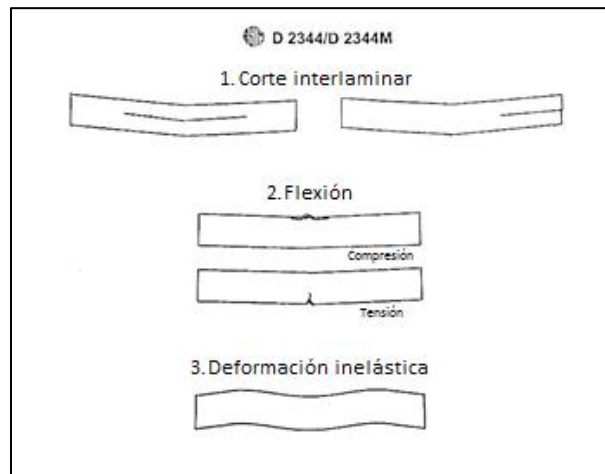


Figura 22: Modos de falla típicos en un ensayo de flexión de viga corta.

La norma menciona que el SBS se asemeja a una tensión de corte desarrollada en el plano medio, cuando se observa claramente una falla interlaminar en el mismo. Si no se observa esta falla, no se puede atribuir la SBS a una propiedad de corte y su valor no conlleva a un valor preciso de la fuerza de corte. Lejos del plano medio, las distribuciones de tensión se vuelven asimétricas y ocurren picos de tensión cerca de la nariz de carga y los puntos de apoyo. Generalmente no es posible relacionar el SBS a cualquier propiedad del material. Sin embargo, los resultados de este test se han encontrado repetibles para una dada geometría, sistema de material y secuencia de apilamiento. También el SBS puede ser usado para control de calidad y la significación de procesos, y para comparar pruebas de materiales compuestos (previando que las fallas ocurren consistentemente en el mismo modo).

Otra norma relacionada es la norma ASTM D 790 [66]. Con anterioridad a 1997, esta norma cubría los ensayos para tres y cuatro puntos; luego quedó reservada para el ensayo de tres puntos y se creó una nueva norma ASTM D 6272 [67] para el ensayo a cuatro puntos. Estas dos normas están bajo la jurisdicción del comité de plásticos (D20). En 2006, el comité de compuestos (D30) emitió una norma específica para compuestos, la ASTM D 7264 [65], que incluye los ensayos de tres y cuatro puntos.

Actualmente la norma ASTM D 790 [67] cubre por tanto la determinación de las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, y se divide en dos procedimientos según las características del material: procedimiento A, para materiales que rompen a deflexiones comparativamente pequeñas (mide módulo de flexión), y procedimiento B, para materiales que sufren grandes deflexiones durante la prueba (mide fuerza de flexión). El método de flexión es similar al del ensayo SBS, pero con especímenes rectangulares más grandes (cuyas dimensiones y separación entre puntos de apoyo varían según el material) y velocidades y dimensiones de los instrumentos diferentes, sirviendo para el control de calidad y para las especificaciones. Asimismo esta norma menciona que cuando un material no falle en las tensiones máximas permisibles por este método se debe recurrir a un ensayo de flexión en cuatro puntos, en donde las tensiones máximas de las fibras se producen en el área que se encuentra entre las dos narices de carga, en lugar de sólo en una línea.

La norma ASTM D 7264-07 es la que se aplica para determinar la rigidez y fuerza de flexión de compuestos con matriz polimérica. Se divide en procedimiento A para flexión en tres puntos de una viga simplemente soportada y en procedimiento B para flexión en cuatro puntos. Este método de prueba pretende interrogar la fuerza de las vigas largas en contraste con la fuerza de las vigas cortas de la norma ASTM D 2344, y la geometría de la prueba está elegida para limitar las deformaciones de corte fuera del plano y para evitar los tipos de modos de falla que ocurren en las vigas cortas.

Las dimensiones estándar de los especímenes son las siguientes:

- Espesor: 4 mm.
- Ancho: 13 mm.
- Largo: 20% más largo que la separación entre puntos de apoyo.
- Separación entre puntos de apoyo: 32 veces el espesor (128 mm).

La velocidad del ensayo es de 1 mm/min, y el diámetro de la nariz de carga y los puntos de apoyo (todos cilíndricos) es de 3 mm. La barra de sección rectangular es flexionada a este ritmo constante, midiendo y registrando la fuerza aplicada y la deflexión en el medio de la distancia entre los puntos de apoyo hasta que ocurra la falla o se supere un valor de deformación pre fijado. Es necesario que el espécimen falle en alguna de las dos caras externas, sin ser precedida la falla por corte interlaminar o choques debajo de los soportes o la nariz de carga. La falla en la superficie tensionada puede ser una grieta, mientras que en la superficie comprimida puede ser un pandeo localizado. Se deben ensayar al menos 5 especímenes, y si más del 50% de los especímenes fallan de forma no adecuada se tiene que reexaminar la separación entre puntos de apoyo o el diámetro de la nariz de carga.

Una relación alta entre la separación de los puntos de apoyo y el espesor es recomendada para determinar el módulo de flexión. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que este módulo puede verse afectado por la secuencia de apilamiento, y no se correlacionará necesariamente con el módulo de extensión (extensional o tensil), el cual no es dependiente de la secuencia de apilamiento.

Con esta norma se pueden calcular la tensión de flexión máxima y la deformación máxima según las siguientes fórmulas:

Tensión de flexión máxima:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (13)$$

Donde σ es la tensión en la superficie en la mitad de los puntos de apoyo [MPa], P es la carga aplicada [N], L es la separación entre puntos de apoyo [mm], b el ancho y h el espesor de la viga. La fuerza de flexión es esta ecuación reemplazando P por la carga máxima.

Deformación máxima:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (14)$$

Donde ϵ es la deformación máxima en la superficie externa [mm/mm], δ es la deflexión en el medio de la separación entre puntos de apoyo [mm], L la separación entre puntos de apoyo [mm] y h el espesor de la viga [mm].

Por último se informa el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos.

Finalmente, la ISO 14125 [68] es otra norma que cubre ensayos de flexión en tres y cuatro puntos de distintos materiales, siendo más ajustada en las posibilidades del espesor, ancho y longitud del espécimen. Es coherente en términos de la velocidad del ensayo y de los radios de la nariz de carga y los puntos de apoyo, y asesora sobre qué tipos de material se deben ensayar bajo una relación específica de espesor y separación entre puntos de apoyo. La Figura 23 muestra las posibilidades dimensionales del espécimen para el ensayo de flexión en tres puntos según el tipo de material ensayado.

Material	Length (mm)	Span (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
Class I	80	64	10	4
Class II	80	64	15	4
Class III	60	40	15	2
Class IV	100	80	15	2

Class I: discontinuous fibre-reinforced thermoplastics.
Class II: mat, continuous mat, fabric and mixed format reinforced plastic. DMC (dough moulding compound), BMC (bulk moulding compound) and SMC (sheet moulding compound).
Class III: Transverse (90°) unidirectional composites. Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $5 < E_{11}/G_{13} \leq 15$ (for example, glass-fibre systems).
Class IV: Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $15 < E_{11}/G_{13} \leq 50$ (for example, carbon-fibre systems).

Figura 23: Dimensiones de probetas recomendadas para diferentes tipos de materiales para ensayos de flexión en tres puntos según la norma ISO-14125 [68].

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se dan a conocer estudios previos referentes a ensayos mecánicos sobre materiales compuestos (especialmente compuestos CFRP) utilizando a la EA como herramienta de caracterización complementaria. Se recopilan datos y conclusiones derivados de ellos como base para la investigación realizada, lo que permite conocer las distintas situaciones que se pueden presentar y estar al tanto de las consideraciones que se deben tener en cuenta al hacer este tipo de ensayos.

3.1 Introducción

Para ensayos mecánicos de diversos tipos de materiales compuestos, muchos trabajos relacionan parámetros de la EA producida como la amplitud o la frecuencia para discriminar los mecanismos de daño. Los trabajos más antiguos se basaban en uno o dos parámetros para establecer rangos o categorías para cada mecanismo. Así, por ejemplo, Gong *et al.* [69] utilizaron la amplitud para discriminar el daño en compuestos de fibra de vidrio y resina epoxi en cinco categorías: entre 33 y 45 dB para el agrietamiento de la matriz, entre 46 y 58 dB para el crecimiento de la delaminación, de 59 a 68 dB para la desunión entre las fibras y la matriz, de 69 a 86 dB para el arranque de las fibras, y entre 87 y 100 dB para la rotura de fibras. Similarmente, De Groot *et al.* [70] clasificaron los daños en compuestos de fibra de carbono y resina epoxi dentro de cuatro categorías utilizando la frecuencia promedio de las señales, ubicando al agrietamiento de la matriz entre 90 y 180 kHz, el arranque de las fibras entre 180 y 240 kHz, la desunión entre las fibras y la matriz en el rango de 240 a 310 kHz, y la rotura de las fibras en frecuencias más allá de los 300 kHz. La utilización de unos pocos parámetros para la clasificación de los daños también puede encontrarse en trabajos más modernos como el de Fotouhi *et al.* [30], en el que, en un estudio sobre el inicio de la delaminación en materiales compuestos de fibra de vidrio, realizaron pruebas de tracción de la resina y las fibras por separado para determinar que el agrietamiento de la matriz y la desunión entre las fibras y la matriz están relacionados a frecuencias bajas (140-250 kHz), mientras que la rotura de fibras está relacionada con eventos de altas frecuencias (350-450 kHz), ubicando a la delaminación entre medio. Para el caso de compuestos de CFRP, Bourchak *et al.* [71] indicaron que las amplitudes entre 60 y 77 dB generalmente representan agrietamientos de la matriz, y las amplitudes mayores a 90 dB significarían delaminación o rotura de fibras.

Como es de esperar, estas clasificaciones son muy específicas para cada material y procedimiento utilizado, sin poder validar los rangos entre materiales compuestos con distinto tipo de refuerzos, o incluso entre el mismo material y condiciones ligeramente distintas. Las firmas acústicas de los eventos de daño dependen del sistema de EA (siendo el sensor utilizado un punto crítico) y están más bien dispersas. En consecuencia, no hay una firma universal para cada mecanismo, y, por lo tanto, uno o más parámetros identificados en un ensayo de tracción no son válidos para estructuras complejas y diferentes cargas aplicadas [53]. Sin ir más lejos, el diámetro y

la resistencia mecánica de las fibras influyen en la amplitud de los hits cuando estas se quiebran, haciendo que la variación de este parámetro sea muy amplia, pudiendo superponerse con los valores de los otros mecanismos de daño, como el agrietamiento de la matriz o la delaminación [4]. Es por esta razón que las técnicas más avanzadas suelen fijarse en las relaciones entre varios parámetros y el análisis estadístico para realizar una identificación más confiable de las señales, citándose trabajos que utilizan el reconocimiento de patrones y el agrupamiento de datos (o clustering) como técnicas de caracterización [6, 16, 26, 29, 50, 53, 72-74].

Una cosa importante a tener en cuenta cuando se trabaja con EA, es que debido a su naturaleza estocástica [43], y a que por su sensibilidad el número de señales puede alcanzar fácilmente los varios miles o más, el tratamiento de los datos es principalmente estadístico, y es más significativo discutir sobre las tendencias de las señales en lugar de sus conductas particulares [40]. También suele ser útil estudiar los comportamientos de los eventos en términos del rango porcentual de la carga máxima en el que estos suceden [4].

3.2 Ensayos de tracción

Uno de los ensayos mecánicos más comunes es el ensayo de tracción uniaxial, debido a su simplicidad y practicidad a la hora de establecer parámetros importantes sobre el comportamiento de los materiales frente a una única fuerza aplicada.

En esta área, Baker *et al.* [74] investigaron la EA modal⁴ y la frecuencia pico de cuatro laminados de CFRP ensayados en tensión que tenían los mismos constituyentes pero diferentes secuencias de apilamiento, trabajando con ángulos de 0, 45 y 90° (probetas rectangulares de 254 mm de largo y anchos y espesores distintos). Los resultados indicaron que el principal daño observado en estos sistemas eran las grietas transversales en la matriz ubicadas en las capas orientadas a 90° respecto de la dirección de carga, siendo estas las regiones más susceptibles para la formación de tales defectos. En cambio, en las capas orientadas a 0° no hubo daños visibles. Evidentemente, según sus estudios, la formación de daños en cualquier capa es dependiente de la posición relativa que tenga respecto a la carga y del tipo de capas que tenga adyacentes. El análisis en frecuencia de las formas de onda y la localización espacial sugirieron que los eventos con una frecuencia pico alta estaban causados por las grietas generadas en las capas de 90° interiores, mientras que los eventos con baja frecuencia pico se generaban presumiblemente por las grietas creadas en las capas de 90° superficiales. En otras palabras, la frecuencia pico depende de la localización de la fisura a lo largo del espesor del laminado. Un dato interesante es que no pareció haber una influencia del espesor en los perfiles acústicos resultantes. Como conclusiones la EA modal únicamente es capaz de adquirir y clasificar las grietas en las capas de 90° de acuerdo a la frecuencia y el contenido energético, y las regiones más gruesas de 90°

⁴ La EA modal es un método basado en la forma de onda de las señales que tiene en cuenta los múltiples modos de propagación en placas delgadas, como los modos simétrico (conocido como extensional, típicamente de alta frecuencia) y antisimétrico (o de flexión, típicamente de baja frecuencia).

(incluyendo a las capas superficiales) tienden a tener las tensiones más bajas para el agrietamiento [74].

En un trabajo posterior de Maillet *et al.* [19], en el que se describe un método para caracterizar la atenuación de la energía acústica basados en las señales obtenidas durante estos ensayos, reafirman que las fisuras de la matriz en las capas de 90° superficiales generan señales de EA con modos de flexión dominantes en baja frecuencia (frecuencia pico < 200 kHz), mientras que las fisuras de la matriz en las capas de 90° interiores generan señales de EA con modos extensionales dominantes en altas frecuencias. Estos autores utilizaron el parámetro de la frecuencia centroide para evaluar la atenuación en sus ensayos y observaron un decaimiento consistente del mismo al aumentar la distancia, siendo más significativo en frecuencias altas. Las conclusiones fueron que la distancia entre la fuente y el sensor, el espesor del material y el contenido de fibra son los factores más limitantes para la identificación del daño, y que las grietas transversales de la matriz pueden ser localizadas con precisión a lo largo del espesor, basándose en el valor de la frecuencia centroide de las señales registradas a corta distancia del daño. A espesor del material constante, sin embargo, la secuencia de apilamiento no afecta significativamente esta dependencia de la atenuación de la energía con la frecuencia.

El trabajo de Muñoz *et al.* [6] combina la EA con la termografía infrarroja (TI) para identificar la evolución del daño en los CFRP bajo cargas de tensión uniaxiales. Los especímenes fueron unidireccionales, de 2 mm de espesor y ensayados con las fibras en la dirección de la carga o transversales a la misma, tomando fotografías digitales e infrarrojas del experimento. La asignación de las señales de EA a cada grupo de daño se realizó con la ayuda de estas imágenes y con el uso de “Técnicas de Reconocimiento de Patrones sin Supervisión” que agrupan cada evento en una categoría según bancos de datos obtenidos por la literatura. Aquí se menciona que las amplitudes y energías bajas se relacionan usualmente con el agrietamiento de la matriz, mientras que las amplitudes altas y los grupos con menor cantidad de señales están relacionados con la rotura de fibras. El grupo intermedio correspondería a la falla de la interface. Se hace un análisis espacial y temporal de los eventos de EA y las fuentes de calor y se identifican algunos rangos de correlación entre la EA y la TI. Sin embargo, como el agrietamiento de la matriz sólo conlleva a eventos de baja intensidad tanto acústicos como térmicos, no es posible encontrar puntos en común entre ellos, concluyendo que la EA es la técnica más adecuada para evaluar este tipo de daño en los CFRP.

Un trabajo interesante sobre la utilización de la EA en el estudio de la respuesta compresiva y de tracción de cilindros de CFRP fue desarrollado por Jia *et al.* en el año 2014 [7], comparando los ensayos sobre el material normal y reforzado con nanotubos de carbono. Los resultados mecánicos manifestaron que la adición de estos nanotubos mejoró significativamente el módulo de compresión de los cilindros, mientras que apenas afectó al módulo de tracción. Esto fue así porque todas las capas de nanotubos mostraron su entero rendimiento bajo cargas compresivas, mientras que bajo cargas de tracción sólo los nanotubos exteriores jugaron un rol a través de la fricción interfacial o con la matriz de resina epoxi; aquí, la adición de estos nanotubos sólo afectó a las propiedades que están controladas por la matriz, mientras que la

rigidez, fuerza y tensión a la fractura en la dirección de las fibras sólo se afectaron muy poco o nada. La Figura 24 muestra las imágenes de los cilindros luego de ser ensayados.

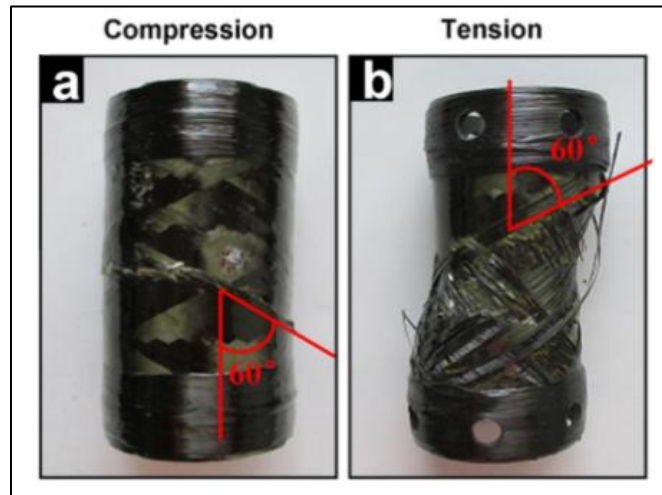


Figura 24: Imágenes ópticas de cilindros de CFRP con refuerzos luego de ensayos de compresión (a) y tracción (b). Imagen tomada de Jia [7].

Respecto a la EA, la poca cantidad de eventos registrados antes de alcanzar el pico de carga máxima indicó que las microfisuras fueron generadas escasamente durante esta etapa o que las mismas eran muy pequeñas como para reconocer la energía. Bajo la carga de compresión, se detectaron más eventos con baja energía para los cilindros reforzados respecto de los no reforzados (Figura 25a₁ vs. Figura 25b₁). La deformación a la que colapsaron fue marcadamente diferente, y la energía liberada fue de 25000 mV.s para el caso reforzado y 30000 mV.s para el caso sin reforzar. Cuando el material estaba reforzado, existieron menos eventos de alta energía antes de alcanzar la carga máxima comparado con el material sin refuerzos. Una explicación razonable de esto es que los refuerzos en la matriz efectivamente activaron abundantes microfisuras y absorbieron más energía evitando la formación de microfisuras (lo cual concordaba con otros trabajos de la literatura, en donde los refuerzos parecían tener un efecto ocultador en las primeras etapas del desarrollo del daño [75]). En las pruebas de tracción, los eventos de EA detectados fueron mucho más abundantes que en las pruebas de compresión, y la falla de los cilindros bajo esta carga fue gradual, mientras que bajo la carga de compresión el colapso fue abrupto (Figura 25a₁ y Figura 25a₂ vs Figura 25b₁ y Figura 25b₂). Estos resultados se relacionan con el comportamiento diferente de la fractura en los CFRP bajo cargas compresivas y de tracción. Basándose en la energía, los resultados de la tracción también implicaron que los refuerzos en la matriz crearon un efecto positivo para desencadenar con eficacia microfisuras abundantes, lo que impidió la formación de macro grietas y, posteriormente, retrasó el colapso de los cilindros y la aparición de más eventos con energía muy elevada. En este caso, también existieron más eventos de baja energía en las pruebas con refuerzo comparado con las pruebas de tracción

sin refuerzo. Todas estas consideraciones dan una idea del comportamiento en EA de los CFRP en relación a su resistencia y a las fuerzas aplicadas tanto de tracción como de compresión.

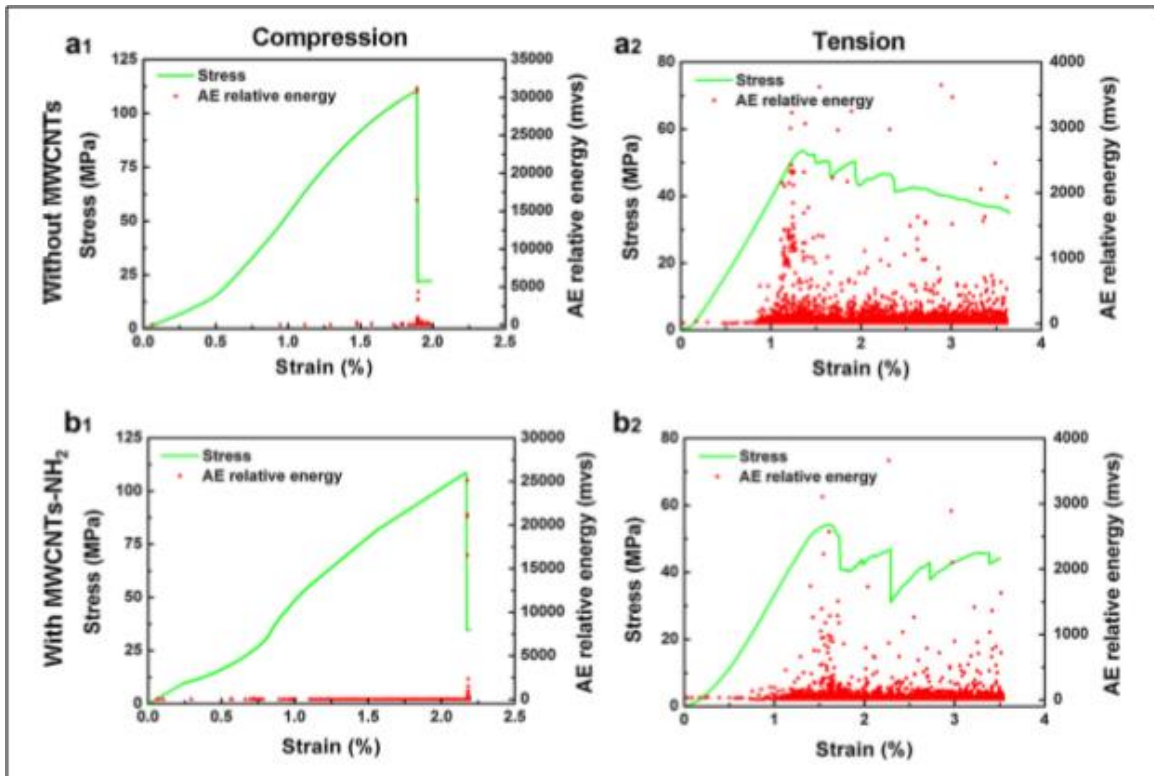


Figura 25: Curvas de compresión y tensión vs. desplazamiento junto a los eventos de EA de cilindros de CFRP con y sin refuerzos. Imagen tomada de Jia [7].

En el caso de los compuestos poliméricos auto reforzados, que se componen de una matriz y un refuerzo de la misma familia de polímeros, el grado de consolidación entre la matriz y los refuerzos juega un papel importante en el comportamiento de la EA. Izer *et al.* [76] estudiaron los mecanismos de falla en diferentes compuestos de polipropileno auto reforzados mediante ensayos de tracción uniaxial y EA, utilizando distintas matrices de este polímero y una tela tejida como refuerzo, y comprobaron que a medida que la adhesión entre la matriz y el refuerzo se mejora, el número de eventos de EA disminuye, provocando a su vez que estos aparezcan más tarde. Resultados similares fueron obtenidos por Lucchetta *et al.* [77] en compuestos auto reforzados basados en una matriz de polipropileno modificada con distintos contenidos de cuarzo y refuerzos de telas tejidas del mismo polímero, registrando que el número de eventos acumulados disminuía al aumentar el contenido de cuarzo (que mejoraba la consolidación entre la matriz y el refuerzo), haciendo que la mayor cantidad de hits aparezca más cerca de la fractura final. Ambos estudios concluyen que en el caso de los materiales compuestos que presentan mejor consolidación, los eventos de EA aparecen tardíamente, produciéndose cerca de la fractura final, y que el número total de hits obtenidos es menor. Esto causa que la forma de la curva de

eventos acumulados en un compuesto con una consolidación deficiente se eleva abruptamente a una pequeña deformación, aumentando de forma continua a partir de ese momento, mientras que en el caso de un material bien consolidado el comienzo de los eventos se produzca cerca de la fractura final.

Otro efecto debido a daños menores previos como el fenómeno de absorción de energía aparece también en el trabajo de Paipetis *et al.* [40], en el que se realizaron ensayos de tracción sobre probetas de CFRP fabricadas a mano, con un espesor de 2 mm y una secuencia de apilamiento $[0_4/90_4]_s$, utilizando más de un ciclo de carga y descarga, de forma que la carga máxima se iba incrementando en cada uno hasta llegar a la rotura, con una velocidad de 5 kN/min para todos los ciclos. Con el objetivo de establecer parámetros útiles para calcular la vida restante del material, una primera aproximación teórica menciona que el agrietamiento en modo I, o tensil, está relacionado con formas de onda cortas y de alta frecuencia, y el modo II o de corte, corresponde a formas de onda largas y de baja frecuencia, mientras que la energía de EA expresa la severidad de las grietas, ya que si esta es grande podría emitir una mayor cantidad de energía que una pequeña. Luego, utilizan la actividad de EA (que se representa como el número de eventos acumulados a lo largo del tiempo, aunque también puede ser cuantificada como el número de hits por segundo) para establecer un primer criterio que puede actuar como indicador de fallas próximas, ya que, siempre y cuando se apliquen las mismas condiciones, el número de actividad de EA acumulada resultó ser bastante repetible para todos los especímenes, correlacionándose bien con la carga máxima de cada ciclo. Finalmente, estudian los parámetros de la energía y el valor RA para concluir que la energía de EA promedio cerca de la fractura final decae más del 90% comparada con la fractura inicial de menor escala, mientras que el valor de RA se incrementa en al menos 20 veces. La explicación radica en que, a pesar de que una disminución en el valor de la energía promedio parezca contradictorio al hecho de que se incremente el ritmo de propagación de las grietas, hay que considerar que como la energía de la fractura se distribuye en muchos más eventos a medida que aumentan la carga y las señales, su intensidad promedio se reduce. Como dato extra, cabe mencionar que en los ensayos observaron que toda la actividad acústica se inició poco antes de la aparición de las grietas transversales.

Una precaución que hay que tener al analizar la actividad de EA es que el parámetro número de hits no pondera el nivel de cada uno [50], ni tampoco su energía o los demás parámetros de una señal de EA, por lo que cualquier evento se toma en consideración más allá de sus características. En un ensayo de tracción, por ejemplo, el 70–80% de la EA registrada puede originarse fuera de la sección calibrada [78], contribuyendo a la actividad acumulada de todas maneras. La localización de las fuentes, los sensores guarda, o incluso la relación de energías entre dos sensores ubicados a ambos lados de la superficie de las probetas pueden ayudar a identificar los eventos de interés dentro de la sección calibrada [78].

3.3 Ensayos de fatiga

Revisando los trabajos en los que la acumulación del daño se estudia por medio de ensayos de fatiga, Bourchak *et al.* [29] investigaron compuestos de CFRP bajo este tipo de cargas y expusieron que la energía absoluta de EA acumulada debida al daño de la matriz y a la delaminación se observó desde etapas tempranas en los ensayos, y que se volvió más moderada a medida que se alcanzaba el final de la carga, cuando las fibras orientadas a 0° soportaban la mayor cantidad de la tensión aplicada (esto se corresponde con los fenómenos que obtuvieron Jia y Paipetis en los trabajos sobre tracción uniaxial que ya se han mencionado [7, 40], y con el trabajo de Austin *et al.* [50], en donde para cada etapa de carga dada en las pruebas de fatiga de CFRP la actividad de EA pareció decrecer gradualmente a medida que el número de ciclos se incrementaba). Aquí, la alta energía de EA acumulada, con hits de amplitudes mayores a 90 dB, fue causada por los rápidos agrietamientos iniciales, conduciendo a la delaminación posterior, cuyos hits tenían amplitudes medias menores a 70 dB. Además, la EA fue capaz de revelar daños significantes en la matriz que eran tanto interiores a las capas (inter laminares) como entre las mismas (intra laminares), los cuales conducían a la delaminación.

En un trabajo posterior [71], los mismos autores explican que con las curvas de la energía acumulada en función del tiempo e identificando los cambios de pendiente o codos sutiles en las tendencias acumuladas, es posible identificar umbrales de falla de fatiga efectivos con cierta confianza y usarlos como criterio en un modelo de predicción de la vida remanente del compuesto (aunque en las pruebas estáticas el primer umbral de falla resultó ser muy dependiente del material y de la secuencia de apilamiento específica). Observando los aumentos repentinos de la energía, se pudieron revelar tres o cuatro etapas de daño en cada ensayo de fatiga: en primer lugar, la matriz comenzaba a agrietarse; luego, el daño se convertía en una falla significativa revelada por este aumento abrupto (primera falla estática efectiva); posteriormente, un segundo pico principal (segunda falla estática efectiva) se observaba, antes de producirse la falla final catastrófica (último aumento repentino) (Figura 26). Sus resultados de EA mostraron además tener buena correlación con las curvas de tensión en función de la deformación, el escaneo ultrasónico y los análisis por microscopía óptica.

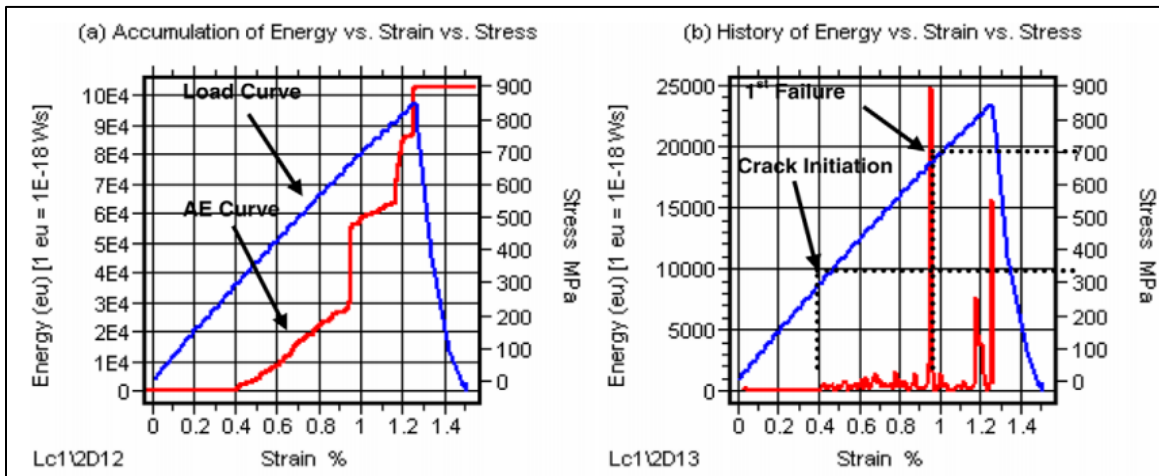


Figura 26: Gráficos de carga vs. cuentas acumuladas (a) y sin acumular (b) en el trabajo de Bourchak *et al.* [71].

En este tipo de ensayos, un criterio basado en la intensidad de la EA para determinar el inicio de la delaminación no es suficiente, debido a que el efecto Felicity agrega actividad de EA con mucha energía antes de comenzar este daño [51]. Otra cosa a tener en cuenta, es que a diferencia de un ensayo de tracción, en el que sólo actúa una fuerza tensionando al espécimen, en un ensayo de fatiga también aparecen fuerzas de compresión que introducen nuevas interacciones dentro del material y pueden generar, según Gagar *et al.* [79], procesos de cierre de fisuras, que dan lugar a la fricción entre las superficies de la grieta y generan fuentes de EA que clasificaron como secundarias. Si bien el trabajo de Gagar estudia la fatiga en placas de aluminio de 2 mm de espesor, es importante notar que encontraron variaciones significativas en la intensidad de las señales de EA entre muestra y muestra durante la propagación de la fisura, pero por medio de análisis estadísticos observaron tendencias acumulativas comunes a todos los ensayos.

En un trabajo reciente de fatiga en compuestos CFRP llevado a cabo por Loutas *et al.* [5], advierten que cupones obtenidos del mismo lote de material, fabricados bajo el mismo proceso y ensayados bajo la misma máquina en condiciones semejantes pueden fallar en un número de ciclos totalmente diferente. Por esta razón, explican que se recurre a modelos y enfoques de pronóstico que en su mayoría se basan en resultados empíricos, adoleciendo del hecho de que no existe una teoría ampliamente aceptada para la falla progresiva de los compuestos, sumado a que los trabajos que adoptan tales enfoques modelan mecanismos de daño específicos (como por ejemplo, delaminación y agrietamiento de matriz) sin considerar sus interacciones, y haciendo una serie de suposiciones. Por esto proponen metodologías basadas en el manejo de datos que son independientes de la disposición de las capas del material y que no hacen ninguna suposición con respecto a la mecánica de los daños, y comparan dos modelos avanzados que dependen de un proceso de capacitación necesario para estimar de manera probabilística sus parámetros, concluyendo que uno de ellos es mejor en la mayoría de los cupones debido a sus predicciones menos volátiles y a que tiene un intervalo de confianza más estrecho.

3.4 Ensayos de flexión en tres puntos

Dos trabajos bastante precisos sobre la caracterización del daño en materiales compuestos de matriz epoxi y fibras de vidrio sometidos a ensayos de flexión de viga corta son los de Fotouhi *et al.* [14, 73]. En ellos, se estudian los diferentes mecanismos de fractura que ocurren en dos especímenes (unidireccional y bidireccional) de 150 x 50 x 5 mm durante estas sollicitaciones, a fin de simular la fuerza de empuje que se genera durante su mecanizado, en particular la delaminación producida por la perforación del compuesto sin placa de soporte (Figura 27).

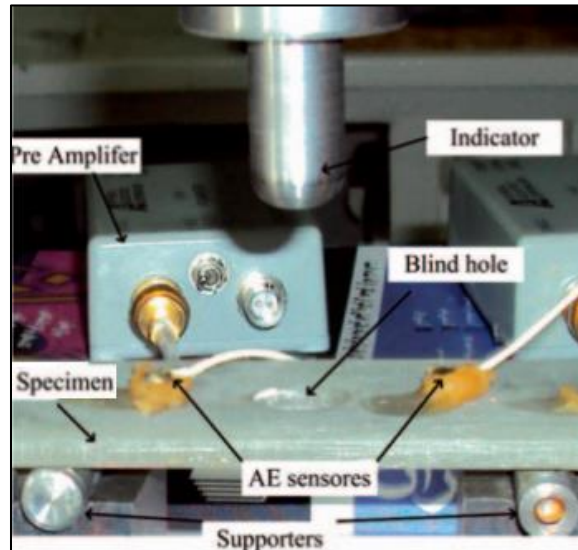


Figura 27: Ensayo de flexión de viga corta en el trabajo de Fotouhi *et al.*[14].

En el primer trabajo [14], se utiliza la distribución de energía, la función sentry⁵ y la distribución de cuentas para detectar e identificar la fuerza crítica en la que comienza la delaminación, mientras que en el segundo [73] se hace un análisis por medio de wavelets y un proceso de clasificación por grupos (clustering) para el mismo propósito. La razón de utilizar el ensayo de flexión de viga corta es que puede simular fuerza de empuje inducida durante todo el proceso de perforación, sin tener que recurrir al modelado que es costoso y complejo ni realizar una gran cantidad de experimentos de mecanizado o analizar modelos matemáticos para comprender los efectos que tienen los distintos parámetros en la delaminación.

Mecánicamente, observaron que a lo largo del proceso de carga, desde el comienzo hasta la carga máxima, la relación entre el tiempo y la carga es aproximadamente lineal, pero después de pasar este punto la no linealidad es significativa. También encontraron una diferencia importante entre los valores de carga máxima de los dos especímenes, siendo bastante mayor la resistencia del espécimen unidireccional que la del espécimen bidireccional. Después de pasar la carga máxima, el diagrama de carga en función del tiempo para el espécimen bidireccional tuvo una tendencia

⁵ La función sentry consiste en la relación entre la energía mecánica y la energía acústica, y equivale a energía de deformación dividido energía de los eventos de EA, en función del desplazamiento.

suavizada, pero para el espécimen unidireccional el comportamiento fue totalmente disímil (Figura 28).

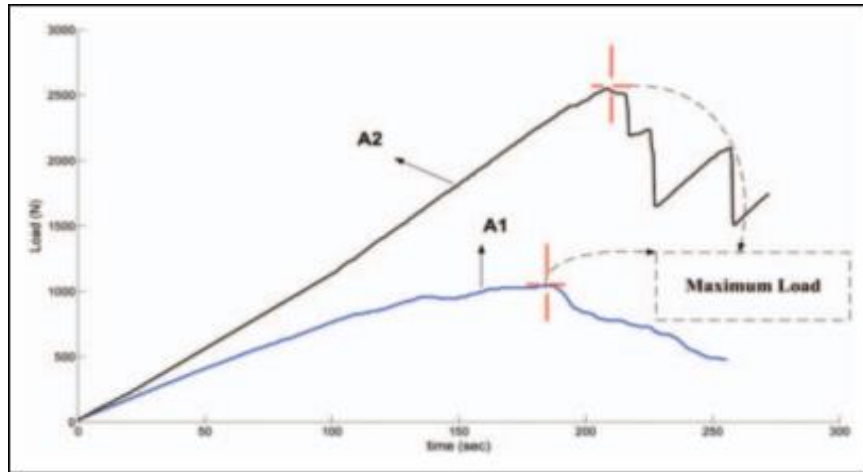


Figura 28: Comparación de los diagramas de carga vs. tiempo para probetas de fibra de vidrio y resina epoxi bidireccional (A1) y unidireccional (A2) en el trabajo de Fotouhi *et al.* [14].

Los autores explican que este comportamiento diferente durante la delaminación está relacionado a la conexión que se produce entre las fibras de dos capas adyacentes, lo que se denomina puenteo de fibras. En estos diagramas, las sucesivas caídas y aumentos de carga corresponden al proceso de propagación de grietas derivado de una extensión repentina de las mismas y su consecuente parada, un proceso generalmente denominado “stop and go”.

Durante el ensayo de flexión de viga corta, varios mecanismos controlan el proceso del daño, por lo tanto, observaron diferentes regiones en el diagrama de las cuentas (Figura 29).

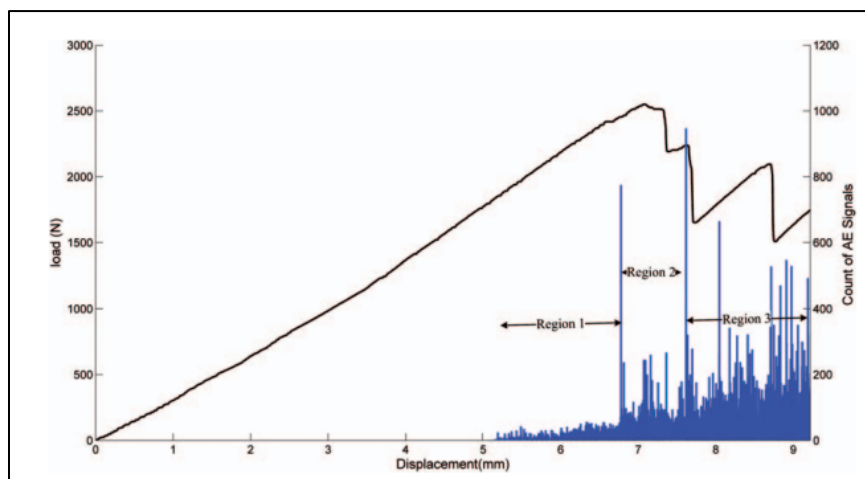


Figura 29: Diferentes regiones en el progreso del daño determinadas por las cuentas sin acumular en una probeta de fibra de vidrio y resina epoxi unidireccional del trabajo de Fotouhi *et al.* [14].

Fotouhi *et al.* explican cada una de estas regiones de la siguiente manera:

Región 1: en esta región no hay daños considerables en el espécimen. Después de la etapa de iniciación, hay una propagación estable de delaminación en esta región, siendo el nivel de daño insignificante. Se observan varios picos de AE débiles que pueden estar asociados con frotamiento, deformación elástica y plástica, causados por el estrés del rodamiento que se generó entre el punto de apoyo y la superficie de la muestra, y algunos otros daños como el agrietamiento de la matriz y la rotura de la fibra durante la delaminación menor. Sin embargo, no hay daños significativos en la muestra y estos daños no tienen un efecto considerable en las tolerancias de perforación. Los datos obtenidos en esta región no tienen tanto efecto en el daño total por delaminación.

Región 2: cuando la carga alcanza un nivel específico, algunos picos fuertes de AE se vuelven visibles. Estas señales de energía relativamente alta probablemente están asociadas con el inicio y la propagación de la delaminación. El comienzo de esta etapa se considera como el inicio de la delaminación mayor. Teóricamente, antes de este punto se detiene la propagación de grietas y se almacena la energía de deformación, siendo compatible con el punto de desviación de la no linealidad en la curva de carga. La reducción de la pendiente en el diagrama carga-desplazamiento que aquí se produce está relacionada con la reducción del módulo de Young. Significativos aumentos en la energía de EA y el recuento generalmente ocurren durante el inicio y la propagación de la delaminación en la segunda región. Cabe señalar que en este trabajo el inicio de la delaminación se considera el nivel de delaminación que causa un daño importante a la estructura, en otras palabras, hay dos etapas en el inicio de la delaminación: la iniciación menor, que está relacionada con la primera iniciación de la delaminación en la primera región, y la iniciación mayor, que se asocia con un daño considerable que comienza a partir de la segunda región.

Región 3: la tercera región está relacionada con la propagación de la delaminación que causa una fractura completa. Debido a la ocurrencia de esta propagación inestable, las energías de EA y las cuentas alcanzan su valor máximo. Estos eventos tienen papeles importantes en el análisis de los mecanismos de falla.

Los resultados de este primer trabajo mostraron que la técnica basada en las caídas de la función sentry era más precisa que la técnica de la energía o de las cuentas, pero la diferencia no es tan marcada, y los tres métodos son herramientas útiles para determinar la carga crítica (Figura 30).

Table 1. Amount of critical loads obtained using three techniques			
Type of the specimens	Average critical load (N)		
	Big fall	AEED	AECD
A1	971	974	975
A2	2497	2489	2482

Table 2. Coefficient of variations resulting from the amount of critical load in three techniques			
Type of the specimens	Coefficient of variations in three techniques C.V.		
	Big fall	AEED	AECD
A1	11%	26%	25%
A2	7%	22%	31%

Figura 30: Cantidad de cargas críticas obtenidas usando tres técnicas para detectar la fuerza específica en la que comienza la delaminación (Tabla 1) y su coeficiente de variación resultante (Tabla 2) en el trabajo de Fotouhi *et al.* [14]. Se puede ver que la diferencia de valores en la cantidad promedio de cargas críticas entre las tres técnicas no es muy grande.

El segundo trabajo [73] incluyó la clasificación por grupos por medio de un algoritmo para determinar los tipos de daño ocurridos durante los ensayos. Se tomaron 10000 señales del espécimen unidireccional y 6000 del espécimen bidireccional y los descriptores de la amplitud pico, la frecuencia promedio y las cuentas para realizar tres grupos principales correspondientes al agrietamiento de la matriz, la desunión entre las fibras y la matriz y la rotura de fibras. Como conclusiones, encontraron tres centros de clases dominantes para cada uno de estos mecanismos de daño con una frecuencia promedio de 139,95 kHz, 265,51 kHz y 412,20 kHz respectivamente. Por otra parte, usando el análisis wavelet, encontraron tres componentes dominantes diferentes en los rangos de frecuencia de 100-190 kHz, 200-320 kHz y 380-430 kHz. Ambas técnicas resultaron ser herramientas útiles para monitorear y caracterizar los modos de falla en estos compuestos, resultando que la rotura de fibras fue el mecanismo de fractura dominante en las muestras unidireccionales, mientras que en las muestras bidireccionales fue el agrietamiento de la matriz.

Martínez-Jequier *et al.* [20] propusieron un algoritmo para clasificar los eventos de EA producidos en compuestos CFRP en los tres mecanismos de daño principales ya conocidos, asociando el progreso de la delaminación a los modos de Lamb antisimétricos (A0) y a los desplazamientos fuera del plano (OP), y el agrietamiento de la matriz y la rotura de fibras a los modos simétricos (S0) y los desplazamientos dentro del plano (IP). Básicamente, establecieron un rango de frecuencias bajas entre 20 y 55 kHz y un rango de frecuencias altas entre 125 y 660 kHz (la banda intermedia se filtró porque en ella los modos A0 y S0 se propagan simultáneamente con amplitudes razonables y a frecuencias similares, haciendo imposible la discriminación de frecuencia), y comparando el valor RMS de las señales en ambas bandas con una

ventana de tiempo muy angosta, clasificaron los eventos como OP o IP, segregando la delaminación de los otros dos mecanismos. Un segundo filtro por frecuencia comparando el valor RMS de las señales por arriba y por debajo de 250 kHz permitió diferenciar entre agrietamiento de la matriz y rotura de fibras (Figura 31).

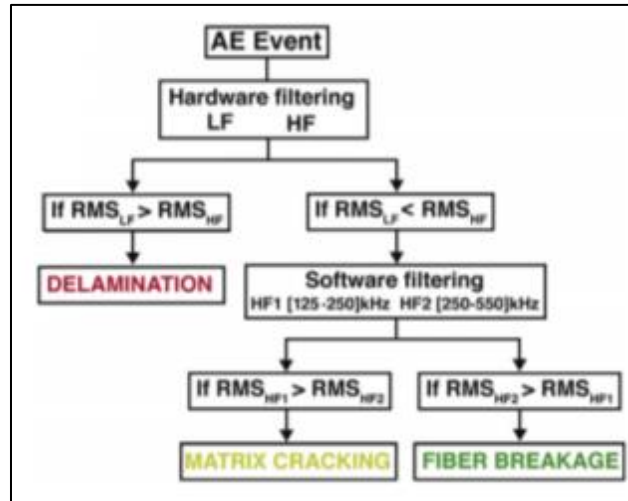


Figura 31: Esquema general del algoritmo propuesto por Martínez-Jequier *et al.* [20] en su trabajo.

En este estudio se trabajó a una velocidad de carga de 0,5 mm/min y con cuatro muestras de 260 x 40 x 4,22 mm y sensores multi resonantes de espectro amplio. La carga máxima de las muestras fue de 2329, 2550, 2288 y 1885 N, siendo menor en las probetas que tenían una delaminación previa inducida.

La teoría de ondas de Lamb también es utilizada por Yu *et al.* [80] para establecer un método confiable que identifique los tipos de daño en los laminados de CFRP al analizar las señales detectadas en un ensayo de flexión de viga corta por sensores piezoeléctricos convencionales y por un sensor de fibra óptica de banda ancha. En concordancia con el trabajo anterior [20], se menciona que el modo S0 domina en la EA causada por fuentes cuya orientación es paralela a la superficie de una placa y ubicada cerca del plano neutral en la dirección del espesor (IP). Ensayando probetas rectangulares bidireccionales [0/90] de 180 x 20 x 1,2 mm, utilizaron dos parámetros simultáneamente para construir un nuevo método de identificación de daños. Estos fueron la relación amplitud del pico del modo S0 sobre la amplitud máxima del modo A0, y la frecuencia pico, concluyendo que el método tiene una buena confiabilidad física debido a que el sensor óptico detectó la tensión dinámica pura causada por la EA en un ancho de banda de frecuencia amplio.

3.5 Atenuación en compuestos de matriz polimérica

Debido a que aún no se han establecido relaciones definitivas entre los diferentes modos de falla y las características de las señales de EA resultantes, y esto sólo puede ser alcanzado si las características distintivas de la onda son preservadas en las mismas a medida que viajan a través de las láminas del compuesto, Asamene *et al.*

[55] realizan una investigación muy útil determinando experimentalmente los coeficientes de atenuación de los modos fundamentales simétrico y antisimétrico a lo largo de diferentes direcciones en dos tipos de paneles de CFRP (Figura 32). Las señales de EA están compuestas por diferentes componentes frecuenciales y modales de las ondas de Lamb. Tanto la frecuencia como la amplitud de las mismas están alteradas por diferentes mecanismos de atenuación a medida que la onda se propaga en los laminados, siendo la naturaleza visco elástica de la matriz la responsable de introducir los mayores niveles de atenuación en el sistema. Esta dependencia modal y en frecuencia de la atenuación produce cambios mayores en las características de la señal de EA dependiendo de la posición relativa del sensor con la fuente, y por eso es importante estudiarlas en diferentes direcciones. En el experimento de Asamene *et al.*, un panel de capas cruzadas y uno cuasi isotrópico fueron excitados por una señal impulsiva de cinco ciclos y una sola frecuencia, abarcando el rango de 100 a 500 kHz con incrementos de 50 kHz. Las amplitudes fueron medidas en puntos equiespaciados hasta una distancia de 250 mm, registrándolas en ambas superficies de las placas para poder separar los modos A0 y S0 sumando y restando las formas de onda.

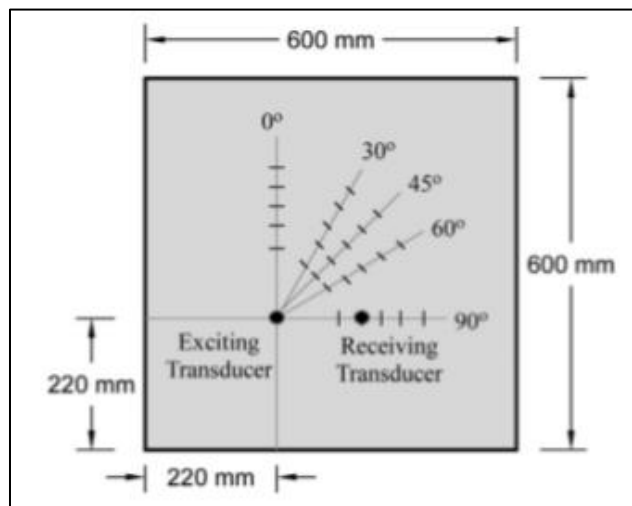


Figura 32: Ángulos de medición en el trabajo de Asamene *et al.* [55].

Los resultados demostraron que, en general, los modos A0 tenían niveles de atenuación significativamente más altos comparados con los modos S0 en ambos laminados. Además, en todas las direcciones de propagación, hay un aumento en la atenuación con la frecuencia. La dirección de propagación de 60 ° fue una excepción en la que la atenuación pareció variar muy poco con la frecuencia para el modo S0. En frecuencias superiores a 300 kHz, el modo A0 fue virtualmente indetectable más allá de una distancia de propagación de 50 mm, mientras que incluso a 500 kHz, el modo S0 conservó casi el 10% de su amplitud después de propagarse una distancia de 250 mm.

El trabajo de Maillet *et al.* [76] también aporta resultados muy útiles en la comprensión de las limitaciones que pueden tener las mediciones en CFRP debido a la atenuación. En esta investigación, los autores se basan en la evolución del parámetro

frecuencia centroide para caracterizar este fenómeno en función de la distancia. Confirmaron que la frecuencia centroide no se vio afectada por las ligeras diferencias en la respuesta en frecuencia de los sensores o por el acoplamiento con la superficie del material, y que el uso de este parámetro en lugar de la frecuencia pico proporciona rangos de valores muy confiables cuando se usan señales EA registradas por el sensor más cercano al instrumento (idealmente en el medio de la sección calibrada). Estudiaron cuatro tipos de especímenes en tracción, observando consistentemente en todos ellos una disminución de la frecuencia centroide al aumentar la distancia de propagación. Esta disminución fue más significativa a frecuencias más altas debido a la dependencia en frecuencia de la energía de atenuación. Para los laminados bidireccionales [0/90] y [45/0/-45/90]_{3s}, la disminución de la frecuencia centroide para eventos de alta frecuencia fue muy consistente a pesar de las variaciones significativas en las disposiciones de las fibras, pero, para el laminado que tenía fibras en la dirección de 45°, encontraron que la atenuación era significativamente mayor que en los otros, y lo atribuyeron principalmente a la reducción del espesor del material (2 mm comparado con 3 mm de los otros laminados) y el mayor contenido de fibra en la dirección transversal a la propagación de la onda. Finalmente, en los laminados [0/90], tanto el agrietamiento de la matriz en las capas interiores como en las superficiales puede ser identificado claramente si la distancia entre la fuente y el sensor es inferior a 40 mm. Más allá de esta distancia, los valores de frecuencia tomados por cada modo de daño se solapan debido a la mayor atenuación experimentada por las señales provenientes de las grietas interiores. Para el laminado que contiene capas a 45°, por otra parte, como la atenuación es más severa la frecuencia centroide no puede diferenciar entre los modos de daño internos y superficiales a una distancia mayor a 10 mm.

Por último, Brunner *et al.* [51] realizaron mediciones de las amplitudes de señales de EA simuladas por la rotura de minas (fuentes de Hsu-Nielsen [81]) a grandes distancias de la fuente en placas de CFRP y GFRP con espesores de entre 3 y 4 mm. Sus resultados se observan en la Figura 33:

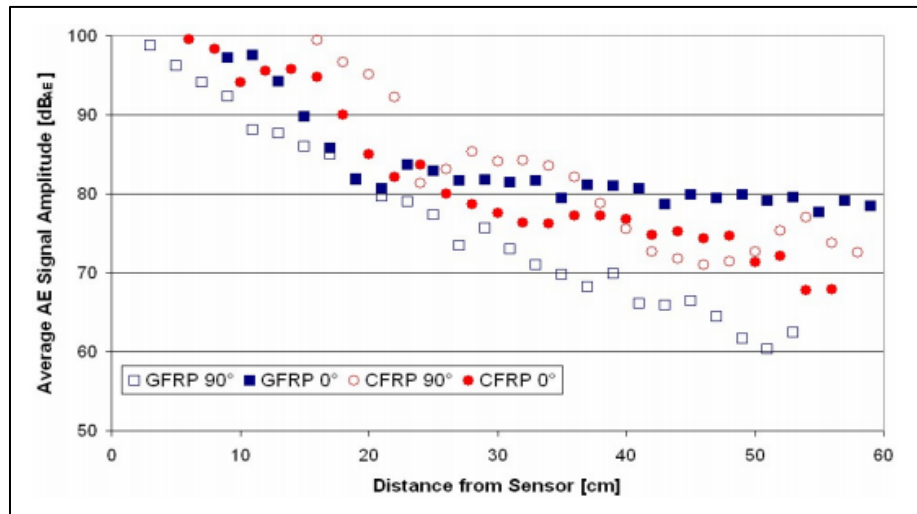


Figura 33: Atenuación en función de la distancia de distintos tipos de laminados de materiales compuestos obtenida por Brunner *et al.* [51] en su trabajo.

Estos autores mencionan que la atenuación depende de la orientación de las fibras y de la calidad del laminado. Enfatizan que conocer la ubicación de las fuentes de EA es de vital importancia para poder corregir por atenuación las amplitudes medidas en la señal, y proponen que, si se supone una dependencia lineal entre la atenuación y la distancia dentro de los primeros 20 cm, estas amplitudes tendrían que corregirse de 1 a 1,3 dB por centímetro entre la fuente y los sensores.

3.6 Otras aplicaciones de la EA en materiales compuestos

El trabajo realizado por Bussiba *et al.* [13] en materiales compuestos de matrices metálica, cerámica y polimérica es un ejemplo de otras aplicaciones de la EA en componentes utilizados para la protección contra escombros y meteoritos en estaciones espaciales y como revestimiento de aeronaves (materiales compuestos de matriz metálica), u orientados a la aeronáutica y la tecnología espacial debido a su fuerza a temperaturas de hasta 1800 °C (materiales compuestos de matriz cerámica).

La aplicación de los CFRP como refuerzo de vigas y columnas de hormigón es otro campo en el que el método la EA ha sido implementado para evaluar su rendimiento y detectar la falla prematura debida a la delaminación, que suele ser el mayor problema de estas estructuras [82, 83, 84, 85, 86].

En paneles sándwich, Assarar *et al.* [72] realizaron un análisis por grupo de las señales de EA correlacionándolas a cada mecanismo de daño típico en estos sistemas, clasificándolas según su correspondencia al daño en el núcleo, el agrietamiento de la matriz, la desunión entre la fibra y la matriz y la rotura de fibras. En este estudio realizaron tanto ensayos de tracción para las pieles, como de corte para el núcleo y de flexión en tres puntos para el panel completo, notando que la EA en los materiales sándwich no es estacionaria (por lo que los descriptores temporales utilizados no eran siempre relevantes), y que la detección de las señales de EA es muy dependiente de la posición de los sensores piezoeléctricos, haciendo que la detección del daño del

núcleo sea débil si los sensores sólo están puestos sobre los laminados, mientras que cuando los sensores están situados sobre la piel superior, se nota una fuerte actividad acústica. El trabajo además aclara que cuando un material sándwich se carga en flexión, los revestimientos absorben las tensiones de tracción y compresión, mientras que el núcleo soporta el esfuerzo cortante, siendo la fisuración de la matriz el mecanismo dominante y que aparece primero en el ensayo.

Finalmente, en el trabajo de Prakash *et al.* [23] se utilizó la EA para evaluar el desempeño, desgaste y los daños producidos por tres tipos de herramientas de corte en paneles de CFRP de 4,16 mm de espesor y capas orientadas a 0, 45 y 90°. Los autores resaltan la facilidad de operación y la respuesta dinámica rápida del método de EA en este tipo de controles indirectos, registrando las salidas analógicas de la señal continua tras ser filtrada y calculando el valor medio en voltios de las mismas para comparar cada herramienta a lo largo de todo el proceso de corte. De esta manera, las ondas de EA (en particular su amplitud) causadas por la acción de corte entre el aparato y la pieza, pueden incluirse como parte de la medición del rendimiento de la herramienta. Los resultados mostraron que durante el mecanizado continuo el valor medio de las señales de EA aumenta a medida que aumenta el desgaste en el instrumento de corte, incrementándose para los tres tipos de herramientas. Así, se pudo determinar que la herramienta con geometría estirada y bordes continuos (Figura 34c) tenía los valores de filtro de salida EA más altos, indicando una baja eficiencia de corte al maquinar el CFRP y produciendo delaminación en el mismo. Por el contrario, las otras dos herramientas (Figura 34a y Figura 34b) no produjeron delaminación y tuvieron valores de salida medios más bajos, siendo la herramienta (a) la que generó una fuerza de corte menor y una rugosidad superficial moderada sin delaminación, ya que tiene bordes discontinuos que evitan la acción de tironear las capas externas superior e inferior del laminado.

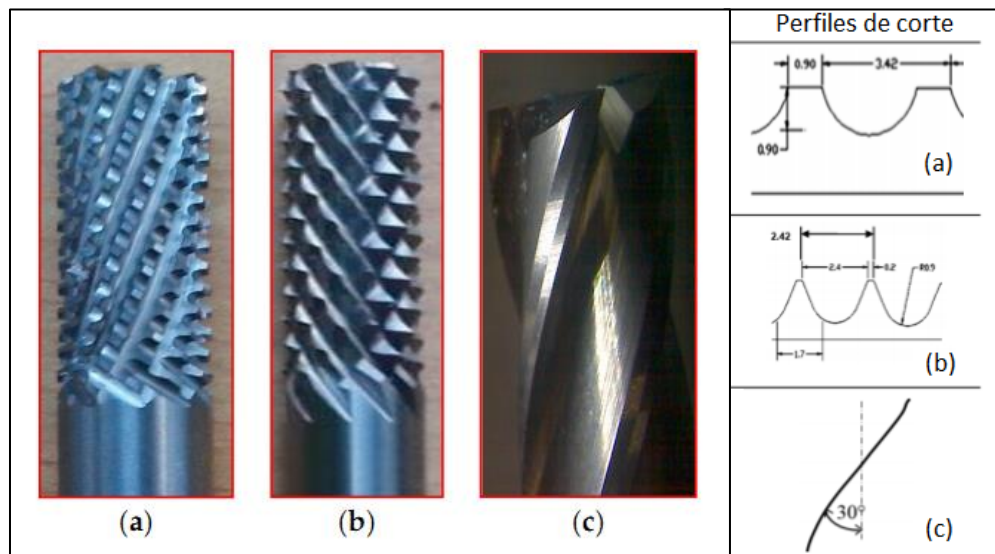


Figura 34: Herramientas de corte estudiadas por Prakash *et al.* [23] en su trabajo junto con sus respectivos perfiles de corte.

CAPÍTULO 4. PARTE EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el equipamiento utilizado durante los ensayos, los tipos de ensayo que se realizaron, sus configuraciones, y los procedimientos que se siguieron para confeccionar a las probetas y llevar a cabo los experimentos.

4.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de tesis se ensayaron probetas provenientes de siete lotes distintos de CFRP, cuyo código de nomenclatura se expresa de la siguiente manera:

N= Nuevo (probetas fabricadas con material en buenas condiciones)

V= Vencido (probetas fabricadas con material vencido)

U= Unidireccional (probetas cuyas fibras están orientadas a 0°)

B= Bidireccional (probetas cuya secuencia de apilamiento es de [0°/90°])

C= Curvas (probetas curvas, fabricadas por filament winding)

K= Kohlenia (empresa que cedió los materiales para ensayar dos lotes de los que se estudiaron en esta tesis)

ar= alta resistencia

br= baja resistencia

sr= sólo resina (probetas en las que las fibras, por su orientación paralela respecto de la nariz de carga, no ofrecieron resistencia a la flexión)

Así, por ejemplo, el lote NUar se leerá como “lote Nuevo Unidireccional alta resistencia”, y el lote KU se leerá como “lote Kohlenia Unidireccional”. Asimismo, cuando se lo requiera, se agregarán los subíndices _{CEA} y _{SEA} para referirse a las probetas ensayadas con EA y sin EA respectivamente.

En la Tabla I se observa la nomenclatura utilizada para cada lote y la cantidad de probetas ensayadas en cada uno de ellos.

Tabla I: Nomenclatura utilizada para cada lote de probetas.

Número de lote	Nombre del lote	Cantidad de probetas ensayadas
1	NUar	18
2	NUbr	5
3	VU	18
4	VB	9
5	NB	9
6	KB	8
7	KC	12

Las probetas de los lotes NUar, NUbr, VU, VB y NB poseen fibras de carbono y matriz de cianato éster, siendo este tipo de CFRP el que se utiliza en proyectos aeroespaciales, mientras que las probetas de los lotes KB y KC poseen matriz de epoxi,

utilizándose este tipo de CFRP en distintas aplicaciones industriales y comerciales (el lote KB posee fibras de carbono y refuerzos entretejidos de fibra de vidrio, mientras que el lote KC sólo posee fibras de carbono).

Los lotes que no son de Kohlenia, son laminados de 60 capas. El lote KB es un laminado de 32 capas, y el lote KC tiene 13 pasadas de fibras.

Por cuestiones organizativas y de comprensión se describirán los experimentos de la siguiente manera: primero se explicará la fabricación de los laminados hechos a mano a partir de pre impregnados con el proceso de laminación manual con bolsa de vacío y autoclave, con los cuales se obtuvieron los lotes VU, VB y NB de la Tabla I. Luego se comentarán los ensayos de SBS sin EA que se realizaron sobre la mitad de las probetas del lote denominado NUar, y por último se describirán los ensayos de SBS con EA que se hicieron sobre el resto de las probetas.

4.2 CONFECCIÓN DE LAMINADOS DE CFRP POR EL MÉTODO DE LAMINACIÓN MANUAL CON BOLSA DE VACÍO Y AUTOCLAVE

Se fabricaron tres laminados de material compuesto CFRP a partir de pre impregnados de fibra de carbono M55J en matriz de resina de cianato éster 954-3, comercializado en forma de bobinas de 308 mm de ancho y 150-250 m de largo por la empresa Hexcel, utilizando un pre impregnado en buenas condiciones para armar una lámina de 60 capas con secuencia de apilamiento $[0^\circ/90^\circ]$ y un pre impregnado vencido y que perdió la cadena de frío por tiempo indeterminado para armar dos láminas de 60 capas, una unidireccional y otra con secuencia de apilamiento $[0^\circ/90^\circ]$. La fecha de fabricación de este pre impregnado vencido fue el 6 de mayo de 2008.

La sala en donde se llevó a cabo la laminación de las placas de CFRP se encontraba libre de polvo y suciedad y los operarios deben ir uniformados con elementos como guantes, cubre calzados y cofias para evitar contaminar las muestras con cabellos, tierra o cualquier elemento perjudicial para los laminados.

A partir del rollo de pre impregnado se cortaron tiras con un espesor aproximado de 10 cm para presentar las capas que luego se unirían retirando el papel protector que cubre una de las caras del pre impregnado (Figura 35a). Estas tiras fueron cortadas en 60 cuadrados de 10 x 10 cm (Figura 35b) y luego apiladas una encima de la otra siguiendo la secuencia de apilamiento correspondiente, uniéndolas en principio por la presión y el calor del operario, teniendo especial atención en que no quedaran burbujas de aire entre las capas, aplanando las superficies con rodillos y espátulas antes de proceder a pegar la siguiente lámina. El papel protector que se encuentra en una de las superficies del pre impregnado se retiró siguiendo la dirección de las fibras para no separarlas ni dañarlas durante este proceso (Figura 36a). Finalmente se obtuvieron los tres laminados (Figura 37) identificándolos según su secuencia de apilamiento y el tipo de pre impregnado utilizado (nuevo o vencido), y se procedió a prepararlos para su colocación en el autoclave con bolsa de vacío y termocuplas.

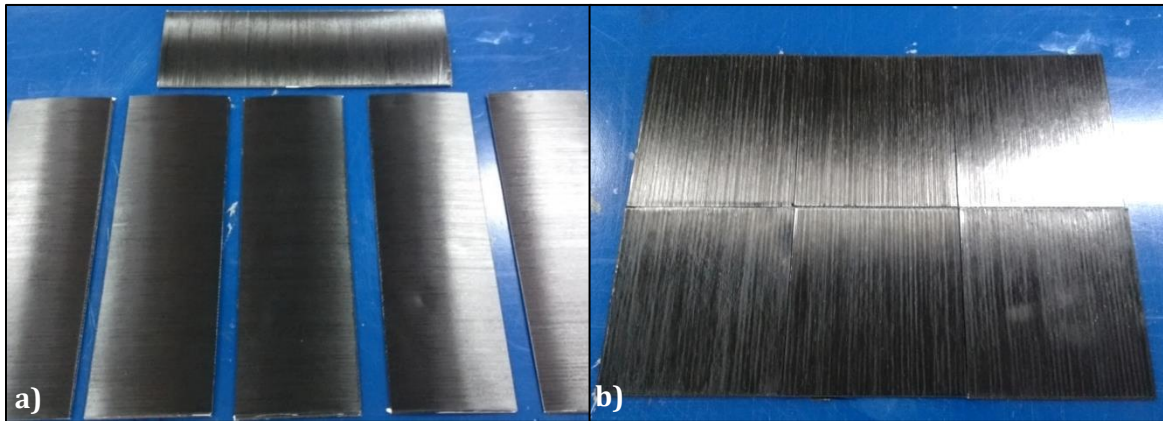


Figura 35: Láminas de pre impregnado antes de ser unidas. (a) Tiras de 30,4 x 10 cm. (b) Cuadrados de 10 x 10 cm.

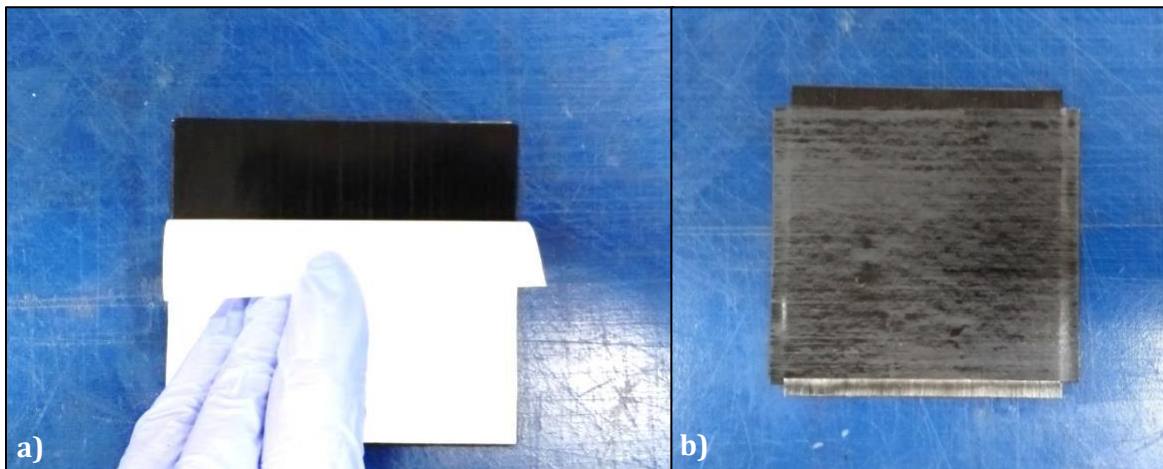


Figura 36: (a) Extracción del papel protector de las láminas durante su apilamiento. (b) Unión de las láminas en la secuencia de apilamiento $[0^\circ/90^\circ]$. Material sin vencer. Los bordes sobrantes fueron acortados posteriormente para conseguir las dimensiones finales.

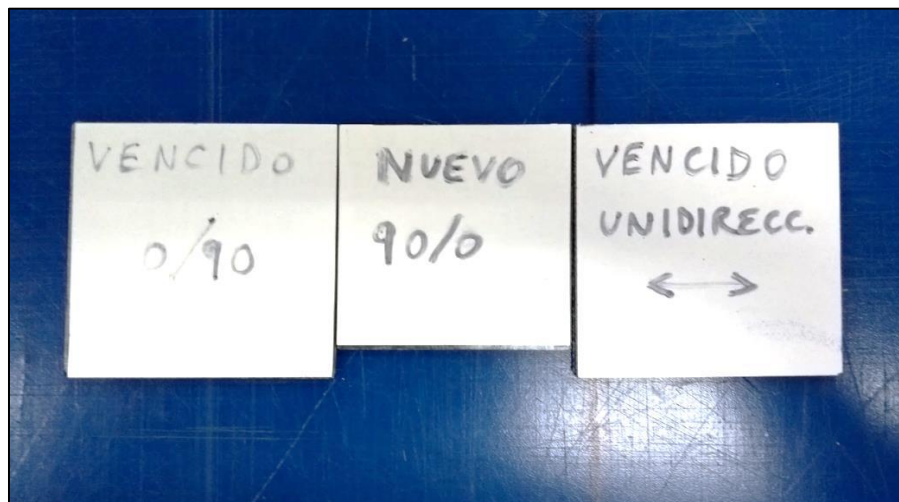


Figura 37: Laminados de 60 capas de pre impregnados clasificados según su secuencia de apilamiento y el tipo de material utilizado para su fabricación antes del autoclave.

Se colocó cada placa en film desmoldante y se las enmarcó para controlar la resina en los bordes y no perder la forma del laminado. Se colocaron paños protectores, la bolsa de vacío, cintas y el tubo de succión para realizar el vacío y colocar todo el conjunto en el autoclave, en donde se le dio presión y temperatura a las placas siguiendo las rampas de calentamiento y presión que se observan en las figuras 38 y 39 por un período de tiempo de 12 hs.

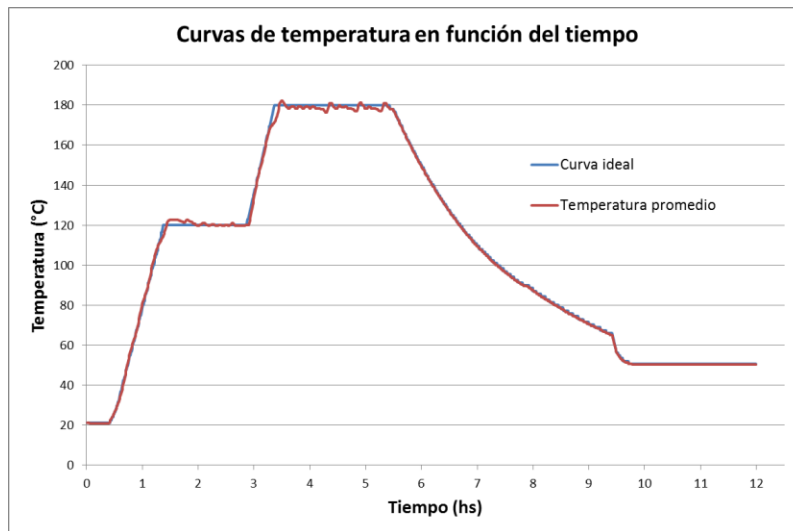


Figura 38: Curvas de temperatura durante el ciclo de polimerizado de los laminados en el autoclave.

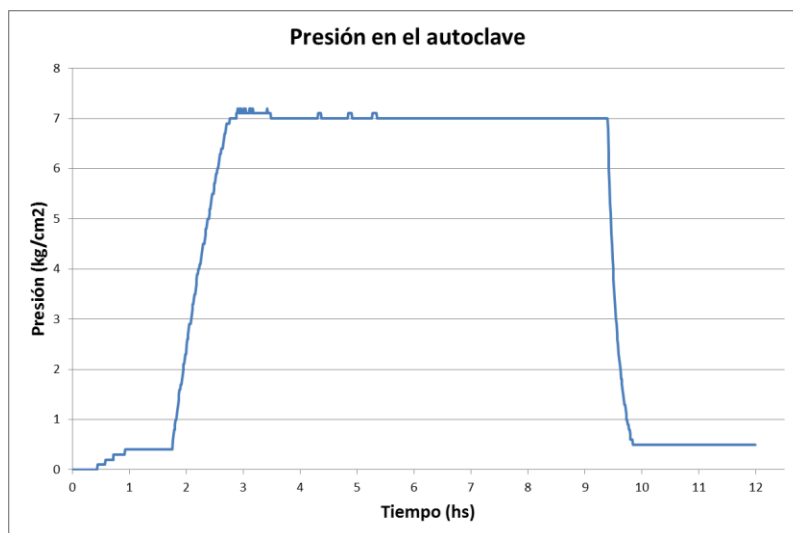


Figura 39: Curva de presión utilizada durante el ciclo de polimerizado de los laminados en el autoclave.

El resultado final de las placas de CFRP se observa en la Figura 40.

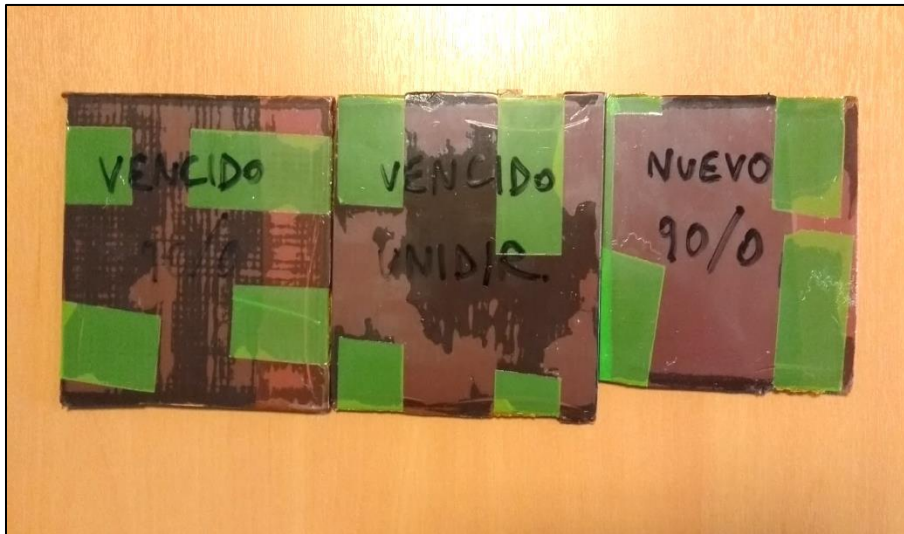


Figura 40: Placas de CFRP obtenidas a partir de pre impregnados nuevos y vencidos con distintas secuencias de apilamiento entre las capas.

4.3 CORTE DE PROBETAS:

En esta sección se describen los métodos y herramientas utilizadas para la confección de las probetas de CFRP utilizadas en los ensayos de flexión de viga corta, dejando constancia además de sus dimensiones finales.

4.3.1 Corte de probetas del lote NUar

Las probetas de este lote fueron obtenidas a partir una placa cuadrada unidireccional de aproximadamente 10 x 10 cm ya fabricada con el mismo tipo de procedimiento y pre impregnados que se describió en la sección 4.2. La misma contenía en su superficie la referencia de su fecha de fabricación (Figura 41).



Figura 41: Placa de material compuesto con la fecha de fabricación del lote escrita en su superficie (10 x 10 cm).

Como primer paso se retiró esta capa protectora de la placa y se midió su espesor en tres posiciones diferentes (superior, centro e inferior), a fin de estimar el largo de las probetas. Luego se identificó visualmente la dirección de las fibras, y se cortaron con una sierra TR 201 E de la marca CLIPPER dos tiras paralelas que se identificaron con los números I y II, como se aprecia en la Figura 42.

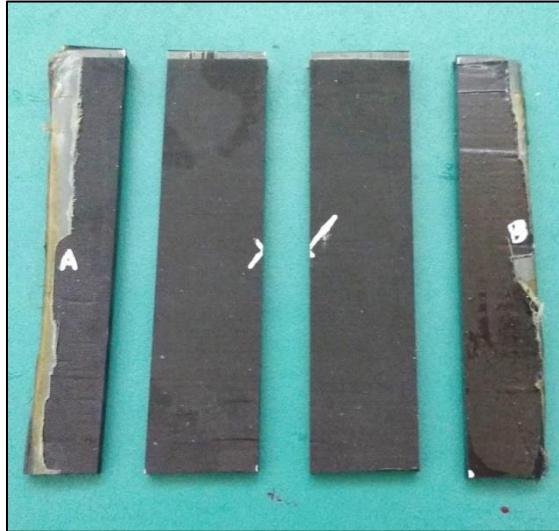


Figura 42: Tiras de material compuesto para la confección de las probetas. La dirección de las fibras es en la horizontal de la imagen.

Estas tiras fueron marcadas con tinta indeleble a fin de asegurar su trazabilidad en el proceso posterior de corte, utilizando una cortadora ISOMET 1000 de la marca BUEHLER con disco diamantado para tal proceso (Figura 43).



Figura 43: Corte de las tiras de material compuesto con la cortadora de disco diamantado.

De esta manera se obtuvieron dieciocho probetas para los ensayos de flexión, nueve por cada tira, identificándolas con lápiz corrector según el lado de la placa al que pertenecían y la posición vertical que ocupaban (Figura 44).



Figura 44: Pobretas para pruebas de flexión identificadas según su posición original en la placa antes de ser pulidas (7,67 x 22,60 mm aproximadamente cada una).

Las dimensiones finales de cada probeta se obtuvieron por medio del desbaste a mano con discos de 220 y 320 micrones, y se resumen más adelante junto con los otros lotes en la Tabla II. Las medidas del espesor y del ancho fueron tomadas en tres puntos diferentes de la probeta (izquierda, centro y derecha), y se promediaron para presentar el resultado. La medida del largo fue tomada sólo en el punto del centro debido a la longitud pequeña del ancho respecto del largo.

4.3.2 Corte probetas del lote NUbr

Las probetas de este lote fueron obtenidas a partir de la placa cuadrada unidireccional con referencia a la fecha de fabricación que se observa en la Figura 45, también ya fabricada con el mismo tipo de procedimiento y pre impregnados que se describió en la sección 4.2. Sus dimensiones eran de 8 x 10 cm aproximadamente, y el espesor fue medido de la misma manera que en el lote anterior para realizar el primer corte sin comprometer el largo de las probetas.

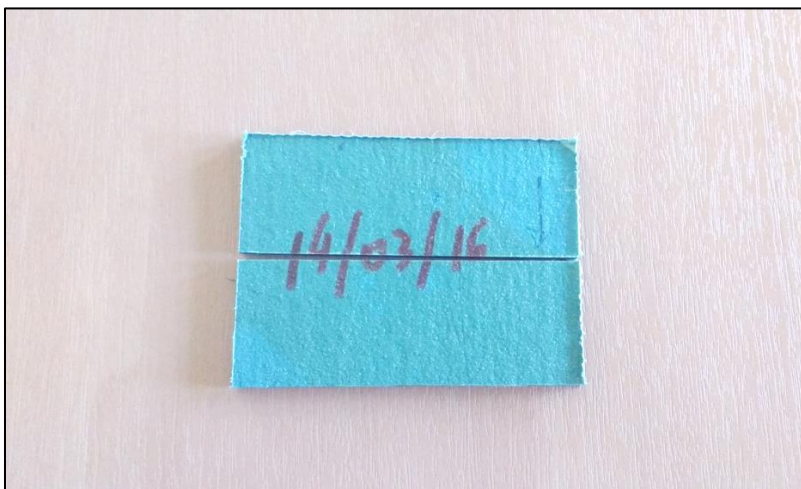


Figura 45: Placa de material compuesto con su referencia a la fecha de fabricación y un primer corte en su centro (8 x 10 cm).

Al retirar la bolsa protectora se observó que las capas exteriores no se encontraban en buen estado produciéndose despegues, dando el primer indicio de que su resistencia máxima podría estar comprometida. Esto se puede apreciar en la Figura 46, donde cada parte de la placa se marcó con lápiz corrector, siendo la tira “B” la más visiblemente dañada.

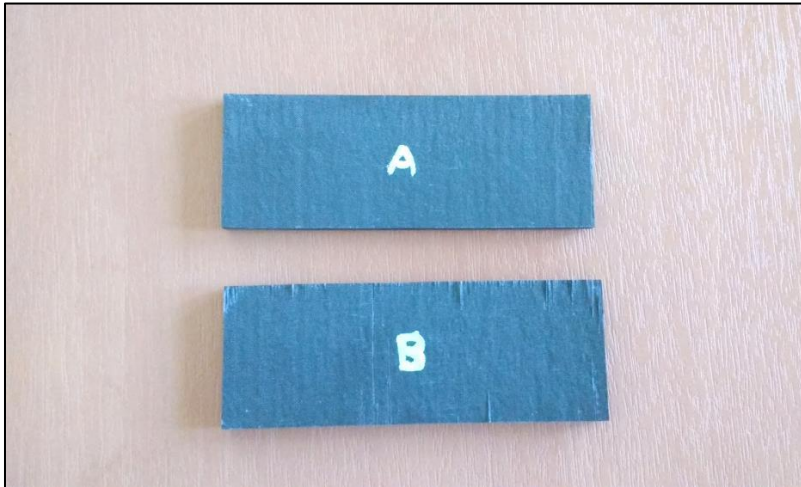


Figura 46: Tiras rectangulares obtenidas a partir del laminado de la Figura 45 (4 x 10 cm cada una). Se observa delaminación en la parte “B” de la placa.

Por esta razón sólo se utilizó la sección “A”, marcándola con tinta indeleble a fin de asegurar su trazabilidad en el proceso posterior de corte. A partir de esta tira se midió nuevamente el espesor en tres posiciones (superior, centro e inferior) a fin de estimar el ancho de las probetas, y se obtuvieron un total de ocho probetas.

Como el mínimo de probetas que se pueden ensayar según la norma es cinco, sólo las probetas 2, 3, 4, 6 y 7 de las ocho maquinadas fueron ensayadas, debido a que eran las que más se ajustaban a las dimensiones finales recomendadas por la norma ASTM D 2344-00 [64] (obtenidas por medio del desbaste con la misma metodología que en el lote anterior).

4.3.3 Corte de probetas laminadas manualmente

Para el corte de estas probetas se siguieron los mismos procedimientos que en los lotes anteriores, para los laminados denominados VU, VB y NB. Se obtuvieron nueve probetas de cada uno de ellos (Figura 47), cuyas dimensiones finales promedio se resumen más adelante en la Tabla II. Además de estas probetas, del lote denominado VU se realizaron nueve probetas adicionales en las que la dirección de las fibras se encontraba a lo largo de su ancho en lugar de ser paralelas a la dimensión mayor, de manera que al cargarlas en los ensayos de flexión de viga corta sea sólo la matriz la que soportara la fuerza. Las dimensiones promedio de estas probetas se dan más adelante en la Tabla II.

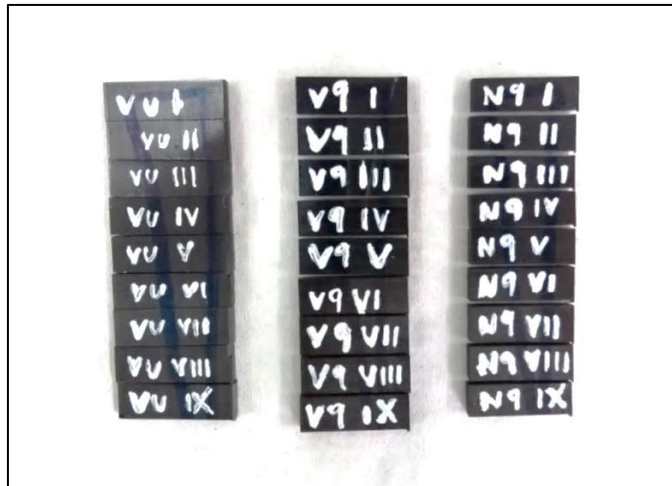


Figura 47: Probetas de los lotes VU, VB y NB utilizadas para los ensayos de flexión de viga corta (7,18 x 21,51 mm aproximadamente cada una).

4.3.4 Corte de probetas del lote KB

Para la confección de estas probetas se partió de dos trozos de laminado bidireccionales cedidos por la empresa Kohlenia (Figura 48). Los mismos tenían dimensiones aproximadas de 15 x 5 cm y 14 x 5,5 cm, con un espesor promedio de 8,45 cm, y en su fabricación se incluyen fibras de vidrio entretejidas a las fibras de carbono de la manera que se observa en la Figura 49.

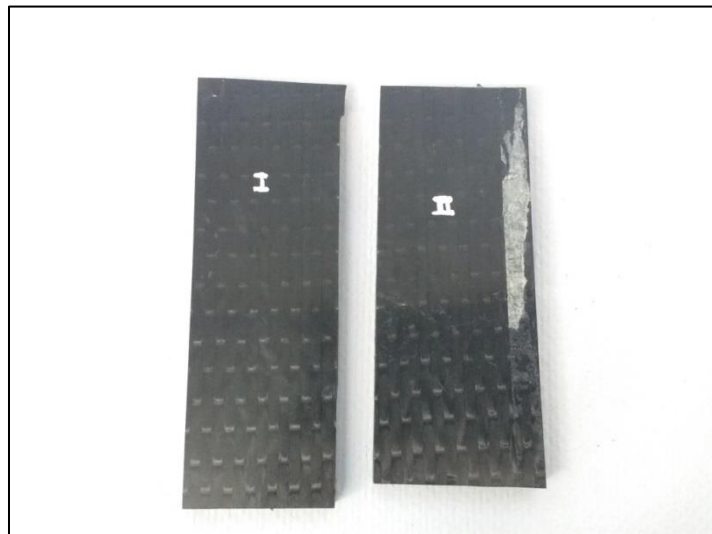


Figura 48: Partes de laminado de material compuesto cedido por la empresa Kohlenia con las que se confeccionaron las probetas del lote KB (15 x 5 cm y 14 x 5,5 cm).

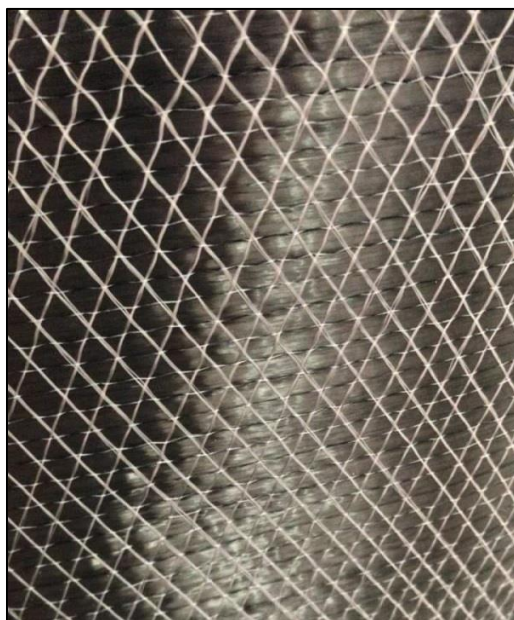


Figura 49: Disposición de las fibras de vidrio entretejidas a las fibras de carbono utilizada para la fabricación de laminados como el de la Figura 48.

Estas partes se cortaron con la cortadora CLIPPER TR 201 E para obtener las ocho probetas que se observan en la Figura 50, que fueron desbastadas con los discos de 220 y 320 micrones para conseguir las dimensiones finales (Tabla II).



Figura 50: Probetas del lote KB terminadas (1,7 x 5 cm aproximadamente cada una).

4.3.5 Corte de probetas del lote KC

Este último lote de probetas se obtuvo a partir la sección de tubo circular fabricado con el método de filament winding por la empresa Kohlenia que se observa en la Figura 51. El diámetro interno del tubo era de 17,42 cm.



Figura 51: Sección del tubo circular a partir del cual se obtuvieron las probetas del lote KC (diámetro interno 17,42 cm).

Según lo especifica la norma, cada probeta debe tener un ángulo de $28,4^\circ$ entre sus extremos. Por esta razón, se dividió a la sección del tubo cada 30° y se la cortó con la sierra CLIPPER que tras realizar cada pasada desgastaba alrededor de 2 mm, obteniéndose de esta manera doce probetas con las dimensiones y el ángulo adecuados para los ensayos (Figura 52).



Figura 52: Probetas del lote KC terminadas (1,4 x 3,6 cm aproximadamente cada una).

El espesor y el ancho promedio se midieron en las zonas izquierda, centro y derecha de las mismas.

4.3.6 Resumen de dimensiones

En la Tabla II se exponen las dimensiones finales promedio de todos los lotes:

Tabla II: Dimensiones promedio finales de cada lote de probetas (en el lote KC el ángulo de curvatura es de $\approx 28,4^\circ$).

Lote de probetas	Espesor promedio (mm)	Ancho promedio (mm)	Largo promedio (mm)
NUar	3,81 ($\pm 0,06$)	7,67 ($\pm 0,13$)	22,68 ($\pm 0,44$)
NUbr	3,54 ($\pm 0,04$)	7,08 ($\pm 0,09$)	21,31 ($\pm 0,29$)
VU	3,58 ($\pm 0,11$)	7,18 ($\pm 0,24$)	21,51 ($\pm 0,65$)
VU _{sr}	3,64 ($\pm 0,09$)	7,21 ($\pm 0,15$)	21,79 ($\pm 0,58$)
VB	3,55 ($\pm 0,06$)	7,06 ($\pm 0,19$)	21,20 ($\pm 0,28$)
NB	3,40 ($\pm 0,08$)	6,83 ($\pm 0,13$)	20,38 ($\pm 0,45$)
KB	8,45 ($\pm 0,05$)	16,72 ($\pm 0,11$)	50,55 ($\pm 0,35$)
KC	2,80 ($\pm 0,03$)	13,76 ($\pm 0,10$)	36,00 ($\pm 0,21$)

4.4 ENSAYOS

4.4.1 Equipamiento

Para los ensayos de flexión se utilizó una máquina de ensayo universal servo-mecánica SHIMADZU modelo 100 kNG (Figura 53).



Figura 53: Máquina de ensayos universal servo-mecánica SHIMADZU 100 kNG.

El sistema de medición de EA consistió en un equipo marca PAC que constaba de dos sensores piezoeléctricos de banda ancha, dos preamplificadores modelo 2/4/6 y una placa de adquisición de datos PCI-2 anexada a una computadora con software

AEWin (Figura 54). Se eligieron sensores de banda ancha en lugar de sensores resonantes porque, si bien los sensores resonantes tienen mayor sensibilidad, aseguran que se capten todos los modos de onda [74] y son capaces de registrar componentes de alta frecuencia generados por las grietas interiores [76], siendo mucho más adecuados para el análisis FFT [51] y las formas de onda [4]. Sin embargo, hay que tener cuidado cuando se usan sensores de banda ancha porque la respuesta no es tan plana como se quisiera (Figura 55), y junto con las no linealidades del camino de propagación y la geometría del espécimen generan que la frecuencia registrada no sea necesariamente la que corresponde a la fuente [4].



Figura 54: Componentes del sistema de medición de EA. (a) Sensores piezoeléctricos de banda ancha. (b) Pre amplificadores. (c) Interfaz gráfica de la placa de adquisición de datos.

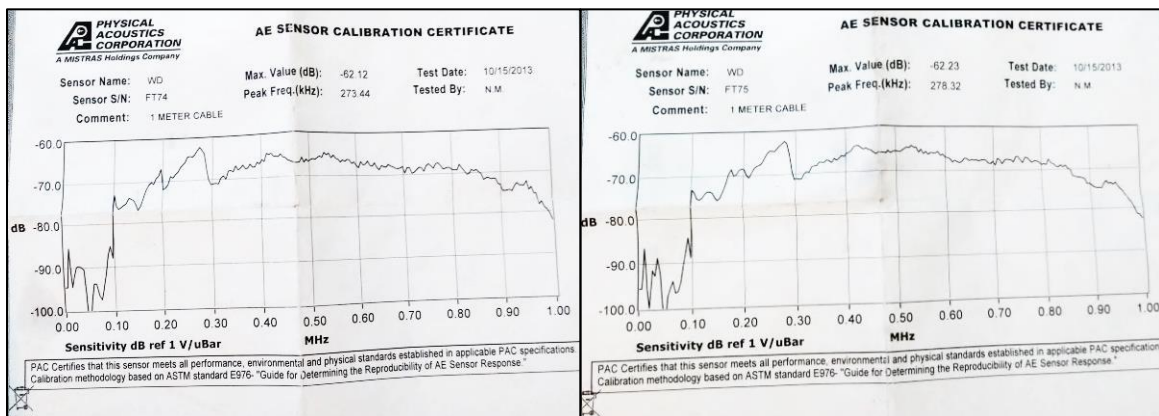


Figura 55: Respuesta en frecuencia de los sensores piezoeléctricos utilizados para las mediciones de EA.

4.4.1.1 Dispositivo de soporte para los sensores de EA

Debido a que las probetas eran chicas respecto al diámetro de los sensores, la colocación de los mismos en contacto con el material sin intervenir en el proceso de carga resultaba dificultosa. Las barras metálicas de los puntos de apoyo tampoco tenían el espacio suficiente como para que los sensores se colocaran en su superficie, en el caso de optar por recoger las señales provenientes de estas zonas (más alejadas de las probetas). Por esta razón, excepto para el lote de probetas curvas, se realizó un dispositivo de soporte específicamente diseñado para mantener el contacto entre los

sensores y los bordes laterales de las probetas, sin entorpecer el proceso de la carga y aislando las vibraciones que pudieran existir entre los aparatos.

Se tomaron las medidas de los sensores y del espacio disponible en la máquina de ensayos para bosquejar en Autocad el esquema del dispositivo que se observa en la Figura 56:

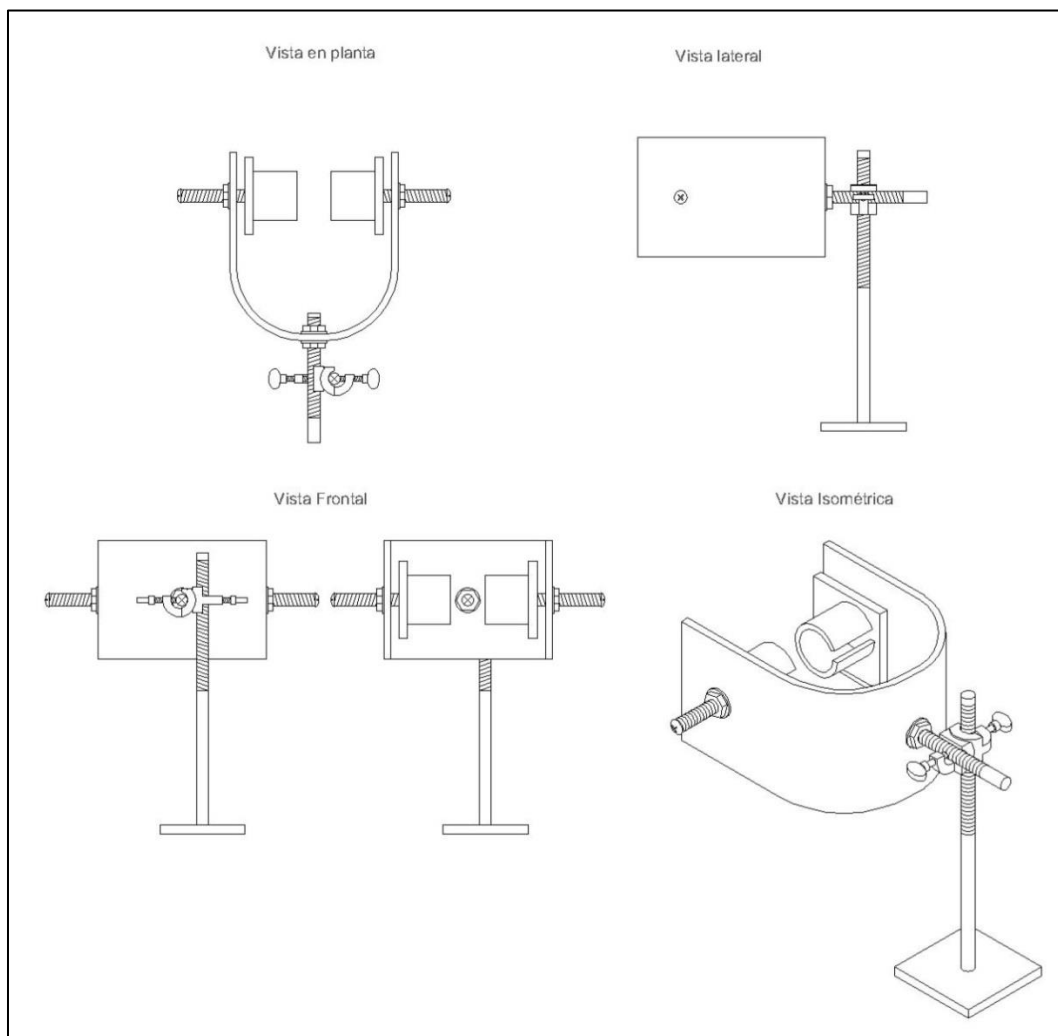


Figura 56: Esquema del soporte para sostener a los sensores de EA durante los ensayos de flexión.

Para su construcción se utilizaron una placa curva de material compuesto (que da la rigidez y la amortiguación necesaria para sostener y aislar al sistema de las vibraciones externas), varillas roscadas metálicas con tuercas metálicas y arandelas metálicas y plásticas, una pieza de ensamble metálica, dos soportes individuales de plástico impresos con una impresora 3D y dos tipos de goma espuma para amortiguar a los sensores dentro de estas piezas.

El esquema para la impresión 3D de las piezas plásticas contenedoras se realizó en Autocad y en SketchUp. La Figura 57 muestra una de estas piezas aislada (Figura 57a)

y con el sensor piezoeléctrico dentro de ella (Figura 57b), y la Figura 58 muestra el dispositivo de soporte general ya terminado. En la Figura 59 se observa el dispositivo colocado en la zona de ensayo antes de ajustarlo para realizar la flexión de la probeta.

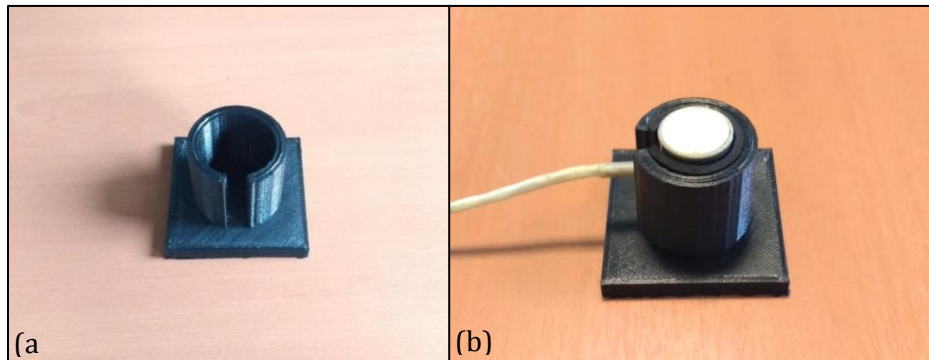


Figura 57: (a) Soporte del sensor piezoeléctrico impreso en impresora 3D. (b) Sensor piezoeléctrico incluido dentro del soporte.

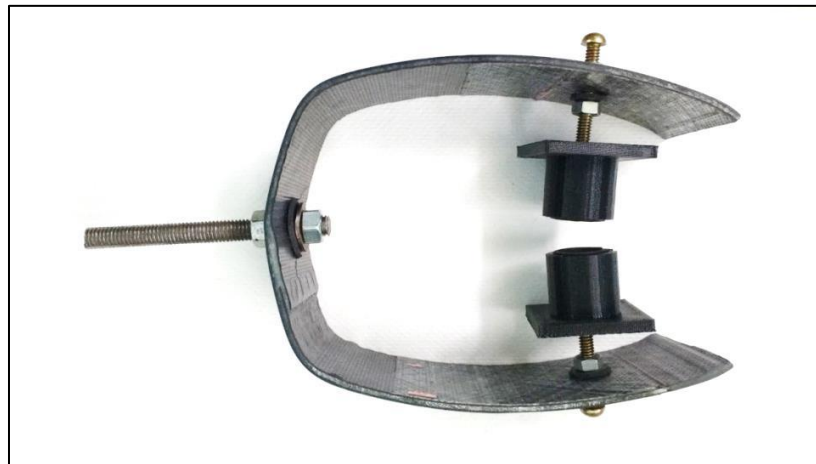


Figura 58: Dispositivo de soporte terminado.

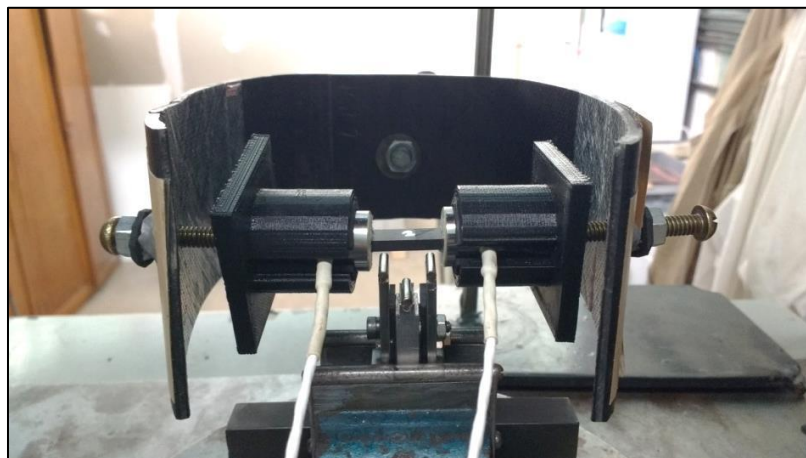


Figura 59: Dispositivo de soporte colocado en la zona de ensayo antes de ajustar el sistema para las mediciones. En el centro se observa una probeta colocada en contacto con los sensores por encima de los puntos de apoyo, antes de bajar la nariz de carga para la flexión.

4.4.2 Ensayos sin EA

Estos ensayos fueron realizados siguiendo el método descrito en la norma ASTM D 2344 [64], para la mitad de las probetas del lote NUar (Figura 60).

Como se mencionó en el apartado de normas, para probetas planas, el ensayo de flexión de viga corta consiste en colocar a las probetas descansando sobre dos puntos de apoyo fijos rígidos de 3 mm de diámetro, separados entre sí por cuatro veces el espesor de la probeta, y flexionarlas en el centro con otra punta o nariz de carga de 6 mm de diámetro moviéndose de manera descendente a una velocidad constante de 1 mm/min, hasta que se cumpla alguna de las siguientes condiciones: que ocurra una caída de carga del 30%; que el recorrido del cabezal exceda el espesor nominal de la probeta; o cuando se produzca la fractura de la probeta en dos partes. La primera probeta fue ensayada de esta manera y la caída de carga del 30% se cumplió poco después de alcanzarse la resistencia máxima. Por esta razón, a fin de inducir más daños en las probetas sin afectar al valor de SBS (que depende de la carga máxima y las dimensiones de los especímenes), los siguientes ensayos se desarrollaron hasta producirse una caída de carga del 60%.

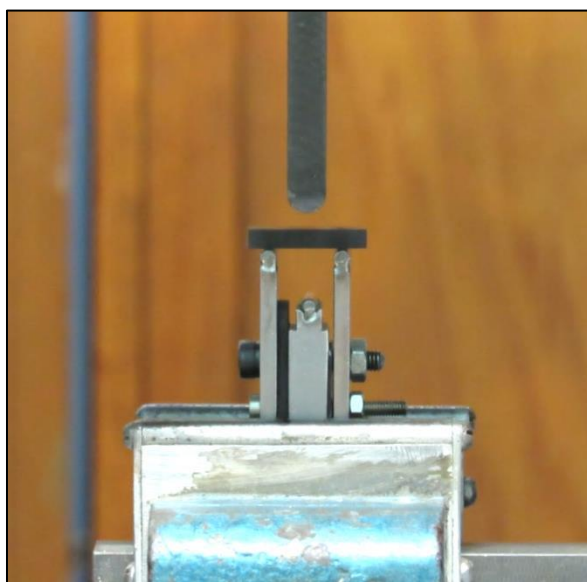


Figura 60: Disposición de la prueba antes de realizar un ensayo de flexión sin EA.

La separación entre puntos de apoyo fue de 15,32 mm, determinándola midiendo el espesor de las probetas, promediándolo y multiplicándolo por 4. La temperatura fue de 24,2 °C y la humedad del 59%.

De estos ensayos se obtuvieron las curvas de carga en función del desplazamiento, la carga máxima P_{max} , y el SBS (calculado según la Ecuación 9).

4.4.3 Ensayos con EA

Las demás probetas de los lotes detallados en la Tabla I se ensayaron incluyendo a la EA como método de caracterización complementario.

En el caso de las probetas rectangulares los sensores de EA se colocaron en contacto con ellas a cada lado por medio del dispositivo de soporte ya descrito en la sección 4.4.1.1 (Figura 61 y Figura 63), mientras que para las probetas curvas los sensores estuvieron en contacto con las superficies de apoyo (Figura 62). En todos los casos se utilizó una fina capa de acoplante acústico (vaselina industrial) entre el sensor y la superficie de contacto para adaptar impedancias y facilitar la transmisión de la onda ultrasónica hasta el piezoeléctrico sin una mayor atenuación.

Antes de comenzar los ensayos se realizaron pruebas de verificación del ruido de fondo en el sistema y simulación de hits para controlar los niveles de la señal por medio del método de Hsu-Nielsen [81], que consiste en la rotura de minas sobre la superficie de las probetas. La rotura de minas produce señales acústicas comparables en magnitud con las señales de las fisuras que se están buscando [63], y por esta razón es muy común para la calibración y caracterización en aplicaciones de campo y está respaldado por muchas normas de EA. Los puntos de rotura se distribuyeron a ambos lados de las probetas de manera que los eventos arribaran a los sensores en tiempos distintos y se pudieran hacer las primeras estimaciones de la velocidad del sonido y la atenuación en el medio. Así, se verificó que ambos sensores respondían de manera equivalente a la misma señal.

La distancia entre los puntos de apoyo se determinó multiplicando por 4 el espesor promedio de las probetas de cada lote ensayado, y para el caso de las probetas curvas, la distancia fue de 12 mm fija según la norma ASTM D 2344-00 [64]. El espesor promedio de las probetas del lote KB excedía el rango de aplicación de esta norma por 2,45 mm, sin embargo, los ensayos se realizaron de todos modos sin limitarse a esta condición de espesor máximo permitido.

La detención de la sollicitación mecánica en las pruebas se realizó cuando se presentó una caída de carga del 30 ó 60% según el criterio del operario, y tras pasar un tiempo prudencial después de alcanzarse la carga máxima en el caso de las probetas curvas, en donde no habían caídas significativas de la carga ni fractura total de los especímenes y se estimaba que el recorrido del cabezal ya había flexionado lo suficiente a la probeta.

Los parámetros de EA de entrada utilizados, configurados para cada lote de probetas, se resumen en la Tabla III.

Tabla III: Configuración de los parámetros de EA utilizada para los ensayos de las probetas.

Lote	Umbral (dB)	Pre amp. (dB)	Filtro inf. (kHz)	Filtro sup. (kHz)	Frec. de muestreo (Ms)	Pre trig. (μs)	PDT (μs)	HDT (μs)	HLT (μs)
NUar	42	20	20	2000	1	50	50	200	300
NUbr	42	20	20	2000	5	50	50	200	300
VU	42	20	20	2000	5	250	50	150	300
VB	42	20	20	2000	5	250	50	150	300
NB	42	20	20	2000	5	250	50	150	300
KC	42	20	20	2000	5	500	50	200	300
KB	45	20	20	2000	5	250	50	150	300

Debido a un problema en la configuración del software, la frecuencia de muestreo del lote NUar es diferente a la de los otros, y por esta razón el análisis en frecuencia de este lote no se llevó a cabo.

En el caso de las probetas de los lotes VU, VB y NB, se ensayaron seis probetas hasta la resistencia máxima y tres deteniendo la carga cuando esta alcanzó aproximadamente el 80-90% de la P_{max} promedio de las anteriores. De esta manera se pudieron estudiar las características del material antes de producirse la falla final tanto por micrografías como por EA.

Finalizados los ensayos, a algunas probetas se las dejó con carga estática por un periodo de tiempo determinado y luego se descargaron a velocidades constantes para observar la actividad de EA durante todas estas etapas.

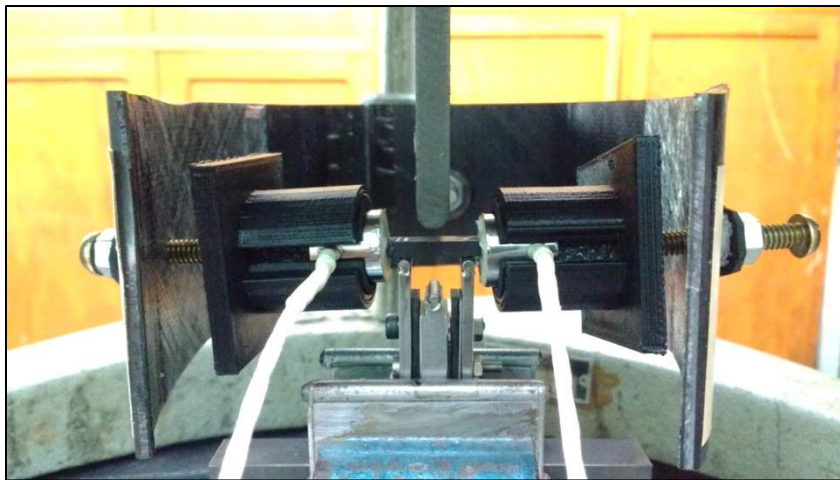


Figura 61: Ensayo de flexión en tres puntos con EA para una probeta rectangular. Se observan la probeta, los sensores piezoeléctricos (con el acoplante entre la probeta y la zona receptora), la nariz de carga y los puntos de apoyo.

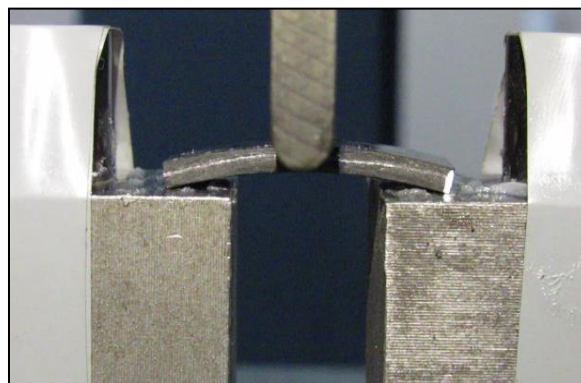


Figura 62: Ensayo de flexión en tres puntos con EA para una probeta curva (sensores sobre la superficie de apoyo).

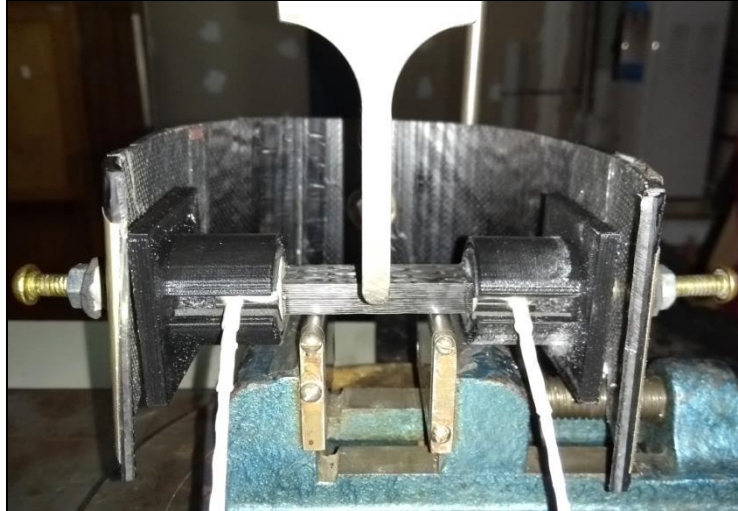


Figura 63: Ensayo de flexión en tres puntos con EA para una probeta rectangular del lote KB.

De estos ensayos se obtuvieron las curvas de carga en función del desplazamiento, la carga máxima P_{max} , el SBS (calculado según la Ecuación 9), y los parámetros de EA y formas de onda de todos los hits registrados durante los mismos.

4.4.4 Ensayos de sólo resina

A fin de estimar la resistencia máxima de la matriz de cianato éster que se utiliza en las probetas de los lotes 1 al 5 de la Tabla I, la mitad de las probetas del lote VU fueron cortadas de manera que la dirección de las fibras quedara paralela a la nariz de carga, y por lo tanto sea la resina (y su interacción con las fibras) la que aporte la mayor resistencia a la probeta. De esta manera, al tratarse de material vencido, los valores de resistencia obtenidos pueden tomarse como mínimos que aseguran que en el material sin vencer no se obtendrán valores inferiores bajo circunstancias similares, adoptándose como margen de seguridad. Además, la EA producida por estos ensayos revela señales que no provienen ni de la delaminación ni de la rotura de las fibras, pudiendo ser útiles para determinar la firma acústica del fallo de la matriz y para comparar con los resultados de las probetas en las que las fibras aportan mayor resistencia.

De estas probetas, dos fueron ensayadas sin EA y el resto con, utilizando la separación entre puntos de apoyo y la velocidad de carga constante indicada por la norma, hasta que la fuerza provocó su quiebre en dos a lo largo de todo su espesor (Figura 64b y Figura 65).

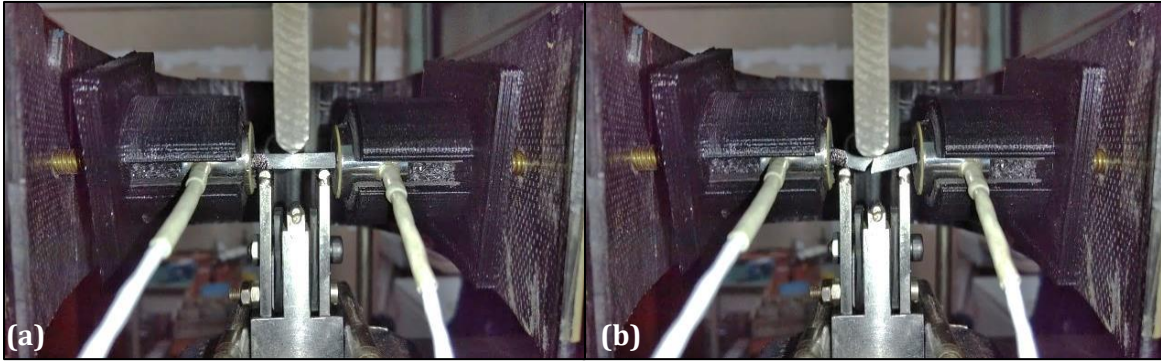


Figura 64: Ensayos de flexión realizados para evaluar la resistencia a la flexión de la resina. (a) Durante la carga. (b) Después de las carga. Se observa el quiebre de la probeta debido a que las fibras están orientadas paralelas a la nariz de carga.

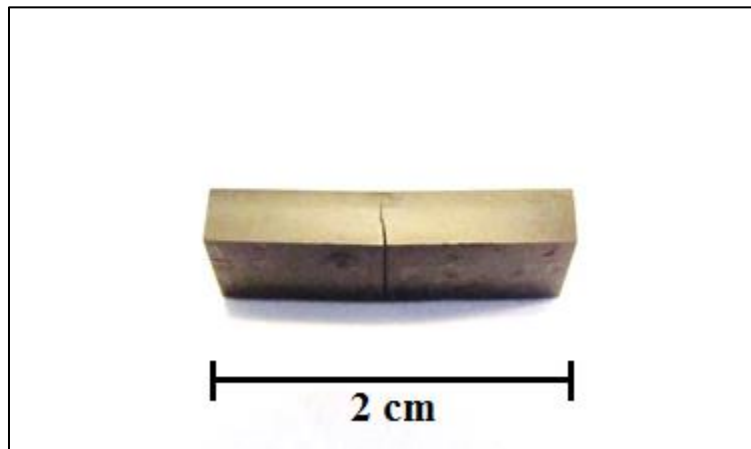


Figura 65: Detalle del quiebre producido durante un ensayo de resistencia a la flexión de la resina.

4.5 IMÁGENES Y MICROGRAFÍAS

Una vez finalizados los ensayos se tomaron imágenes y micrografías ópticas de diferentes probetas seleccionadas para observar los modos de falla existentes en el material flexionado. Las imágenes fueron tomadas con cámara digital y con lupa electrónica y las micrografías fueron capturadas con un microscopio óptico marca OLYMPUS con una capacidad de aumento de hasta 50X (Figura 66).



Figura 66: Microscopio utilizado para la captura de las micrográficas.

Para las micrográficas las probetas fueron incluidas en resina (para ser manipuladas con mayor facilidad) y pulidas en etapas sucesivas con discos de 400 y 600 micrones, y luego con paños con pasta de diamante de 6 y 1 micrón, los cuales dejan a la superficie espejada y libre de rayas (Figura 67).

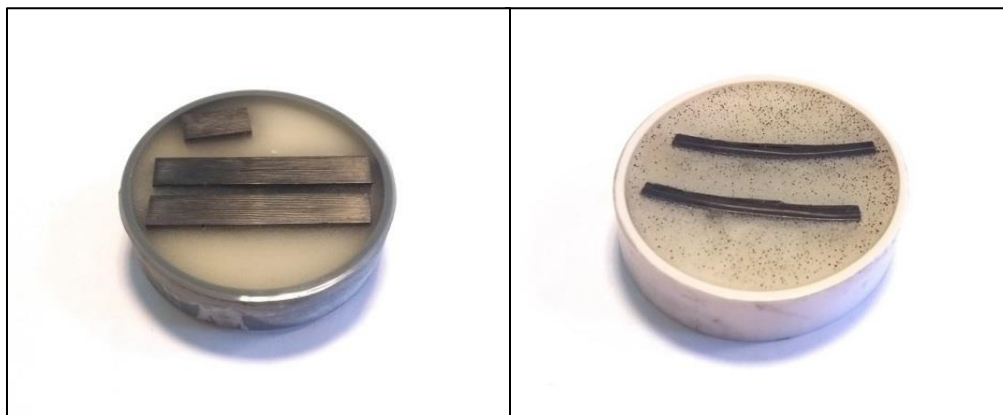


Figura 67: Probetas incluidas en resina luego de ser pulidas para la obtención de las micrográficas.

La elección de las probetas a micrografiar se basó en diferentes criterios que incluyeron: presentar los mayores o menores daños visibles, tener la resistencia máxima, mínima o más parecida al promedio entre las de su lote, o haber presentado características distinguidas en su comportamiento de EA.

4.6 SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Para el procesamiento de las señales de EA y de los parámetros externos, se programaron algoritmos por medio de Matlab y se crearon interfaces gráficas que permitieron manipular y controlar los datos suministrados por la máquina de ensayos universal y la placa de adquisición de datos de EA. Con ellos, se obtuvieron gráficos con la relación entre varios parámetros (mecánicos y de EA) y los resultados del análisis temporal y en frecuencia (FFT) de los hits registrados.

Las interfaces gráficas programadas incluyeron:

- Análisis de la cantidad de hits discriminando según su amplitud en diferentes periodos de tiempo.
- Análisis del promedio de los parámetros de EA en diferentes rangos porcentuales de la carga máxima.
- Análisis temporal y en frecuencia de las formas de onda de los hits.
- Comparación de las curvas de carga de hasta nueve probetas.
- Gráficos de varios parámetros comparados con las curvas de carga en función del tiempo, con la posibilidad de separar los canales, filtrar la amplitud y la carga, colocarle el nombre a la probeta, multiplicar la carga y guardar las figuras.

En la Figura 68 se observa el aspecto de una de estas interfaces.

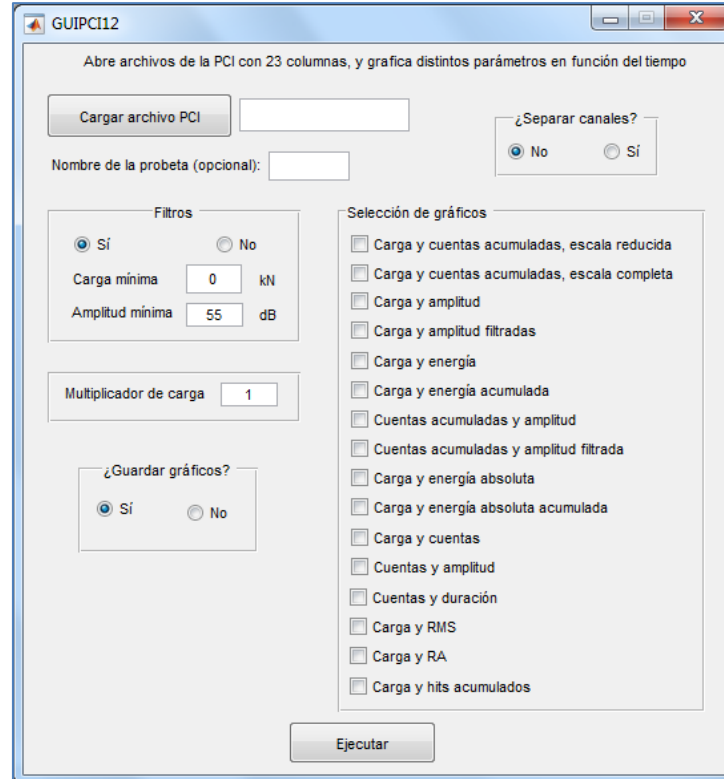


Figura 68: Interfaz gráfica utilizada para la obtención de las imágenes de los parámetros en función del tiempo.

Para el análisis por medio de wavelets, se utilizó el software producido por la marca Vallen Systeme llamado AGU-Vallen Wavelet R2015, que utiliza la transformada de Gabor, con una resolución en frecuencia de 9,766 kHz, una frecuencia máxima de 1 MHz y un tamaño de wavelet de 200 muestras en un rango de 10000.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados tanto mecánicos como de EA obtenidos a partir de los ensayos de flexión de viga corta de las probetas ya descritas en el capítulo previo, incluyendo también los resultados de las imágenes y micrografías tomadas a los especímenes. Junto con esto, los resultados se analizan y se discuten a medida que se los presenta, de manera que se allane el camino hacia las conclusiones.

5.1 ESTIMACIÓN DE LA ATENUACIÓN Y LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LAS PROBETAS

Las roturas de minas de lápiz en las probetas del lote NUbr y en las probetas del lote KB permitieron hacer una primera aproximación de la velocidad del sonido en el sentido longitudinal de las mismas. Calculando la diferencia de tiempo entre el arribo de la señal a los dos sensores y conociendo la longitud de las probetas (~20 mm para las probetas NUbr y 50 mm para las probetas KB) se obtuvieron velocidades promedio de 12890 y 6595 m/s respectivamente, suponiendo que la rotura de la mina fue exactamente al lado de cada sensor de EA. Como la rotura de la mina se realizó algunos milímetros alejada de los sensores, las velocidades calculadas respectivas pasan a ser 10312 y 5276 m/s, si se supone que la rotura de la mina se efectuó a 1/5 de la longitud total de la probeta. Por otra parte, las atenuaciones promedio de las señales registradas en estos lotes fueron de 2 y 3,5 dB respectivamente, con valores máximos de 3 dB en las probetas del lote NUbr (unidireccionales) y 7 dB en las probetas del lote KB (bidireccionales). Estos valores de atenuación concuerdan con la corrección de 1 a 1,3 dB por centímetro entre la fuente y los sensores que mencionan Brunner *et al.* [51] en su trabajo si se supone una dependencia lineal entre la atenuación y la distancia dentro de los primeros 20 cm. Además, en base a los trabajos de Maillet *et al.* y Asamene *et al.* ya discutidos en el estado del arte [19, 55], se puede asegurar que debido al tamaño reducido de las probetas no se apreciarán otros efectos de la atenuación por distancia en los especímenes.

Para tener una medición más precisa de la velocidad del sonido en las probetas de CFRP se realizaron mediciones con US en las probetas del lote NUar (Figura 69), midiendo en las direcciones longitudinal (a través del largo) y normal (a través del espesor) de las mismas. El equipo registró una velocidad longitudinal de 11424 m/s al emitir una frecuencia de 13,777 MHz sobre una probeta de 22,90 mm de largo, y una velocidad normal de 1935 m/s al cuando se trabajó con 13,562 MHz y en un espesor de 3,88 mm. El primer valor es coincidente con un trabajo del año 2014 inspeccionado en la literatura [87], estudiado sobre barras de un compuesto de poliéster reforzado con un volumen de fibras de carbono del 70%.



Figura 69: Medición por US de la velocidad del sonido en la dirección de las fibras (a) y normal a las mismas (b).

Estos resultados demuestran que el sonido se propaga a velocidades extremadamente rápidas a través de las fibras de carbono, mientras que cuando las fibras no están orientadas en la dirección de propagación de la onda la velocidad del sonido disminuye considerablemente (83 % menos en este caso).

Las mediciones de US sobre las probetas bidireccionales del lote KB no mostraron ecos distinguibles en las muestras que pudieran arrojar valores de la velocidad del sonido en las mismas, debido a la naturaleza de fabricación del propio material. Por lo tanto, basándose en las estimaciones que se obtuvieron con las roturas de las minas, al alternar capas con distintos ángulos de apilamiento la velocidad del sonido en la dirección longitudinal disminuye respecto de la velocidad longitudinal de probetas unidireccionales, y la atenuación será mayor.

5.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

Los resultados de los ensayos mecánicos se derivan de los datos suministrados por la máquina de ensayos universal SHIMADZU e incluyen las curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas, la carga máxima alcanzada y su valor de SBS.

Las curvas de carga de todos los lotes, más las curvas de carga de las probetas del lote VUsr en las que se ensayó la resistencia de la matriz, se presentan en las figuras 70 a 81.

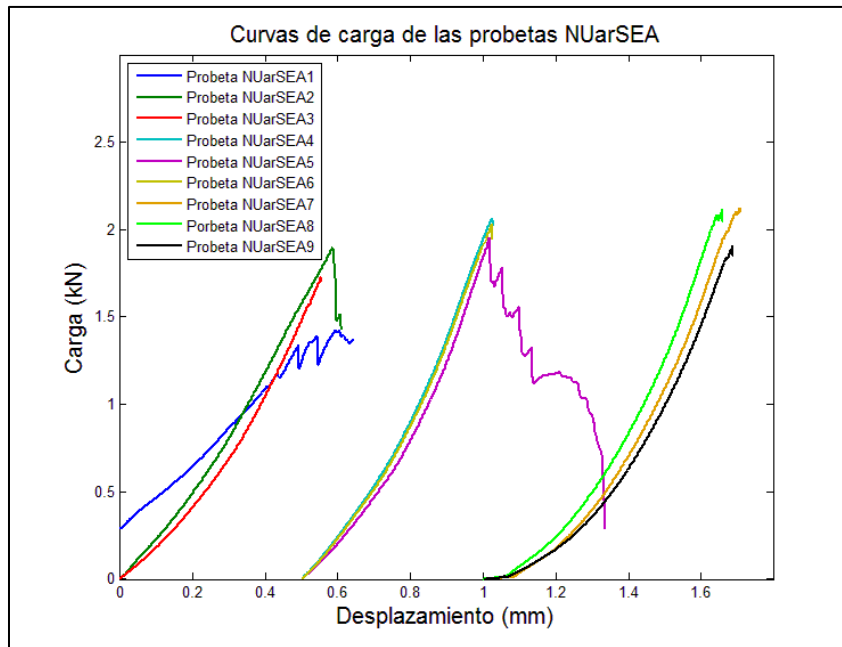


Figura 70: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote NUar ensayadas sin EA. Las curvas se encuentran agrupadas de a tres y desfasadas 0,5 mm por cuestiones de claridad. La probeta NUar_{SEA}1 presenta un comportamiento atípico debido a precargas y deslizamientos indeseados del cabezal.

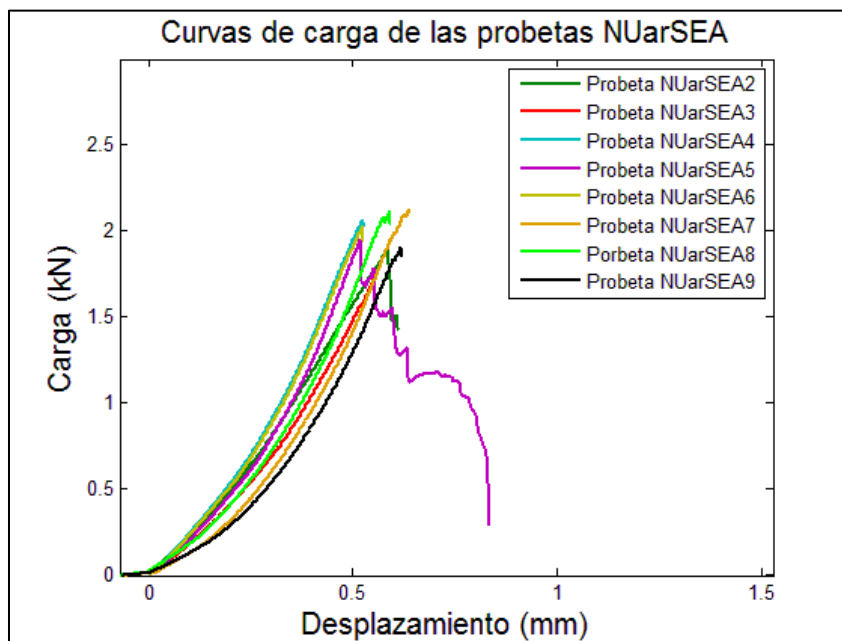


Figura 71: Comparación de las pendientes en las curvas de carga de las probetas NUar_{SEA}. La probeta NUar_{SEA}1 está excluida debido a que por precargas y deslizamientos indeseados del cabezal presentó una pendiente muy distinta a la de las otras curvas.

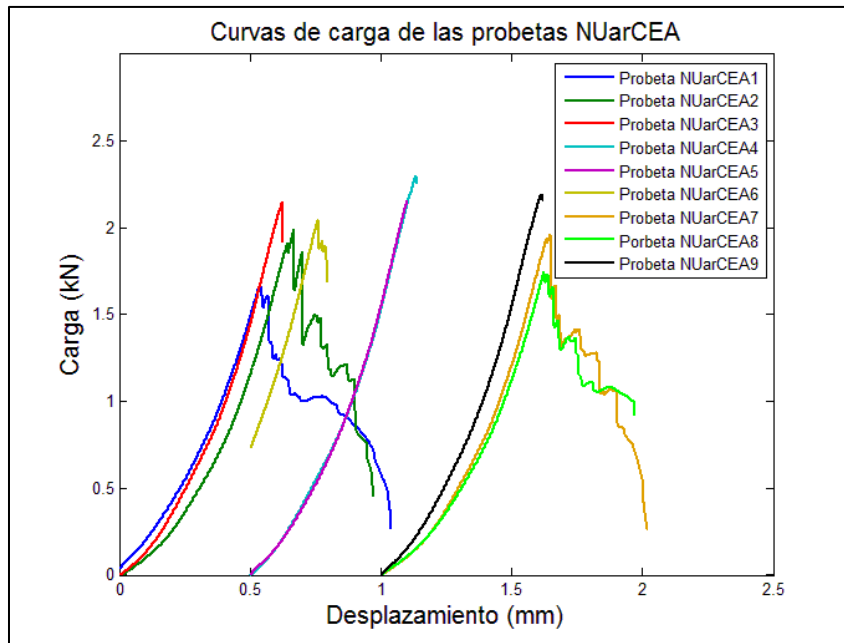


Figura 72: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote NUar ensayadas con EA. Las curvas se encuentran agrupadas de a tres y desfasadas 0,5 mm por cuestiones de claridad.

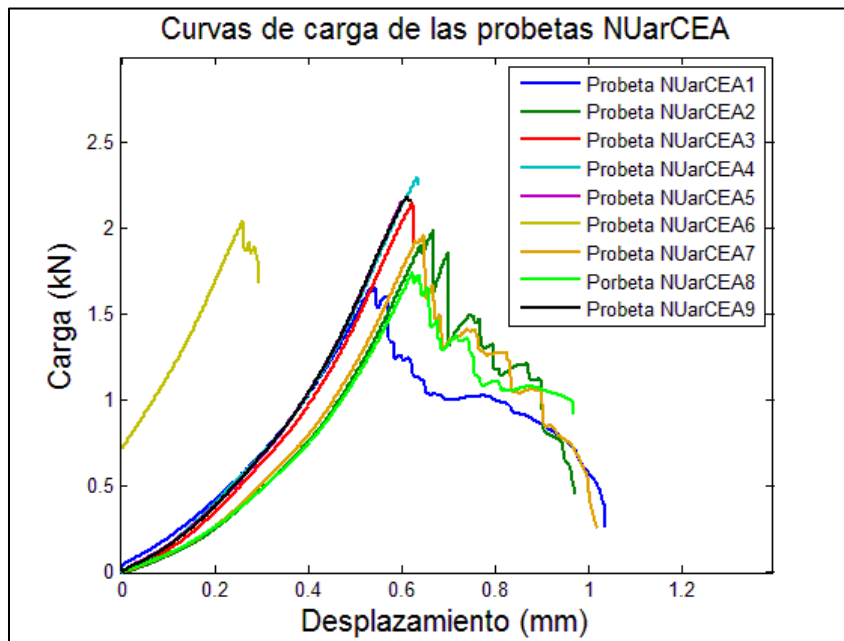


Figura 73: Comparación de las pendientes en las curvas de carga de las probetas NUar_{CEA}. A pesar de la precarga en la probeta NUar_{CEA6}, la pendiente se mantuvo acorde a la de las otras curvas.

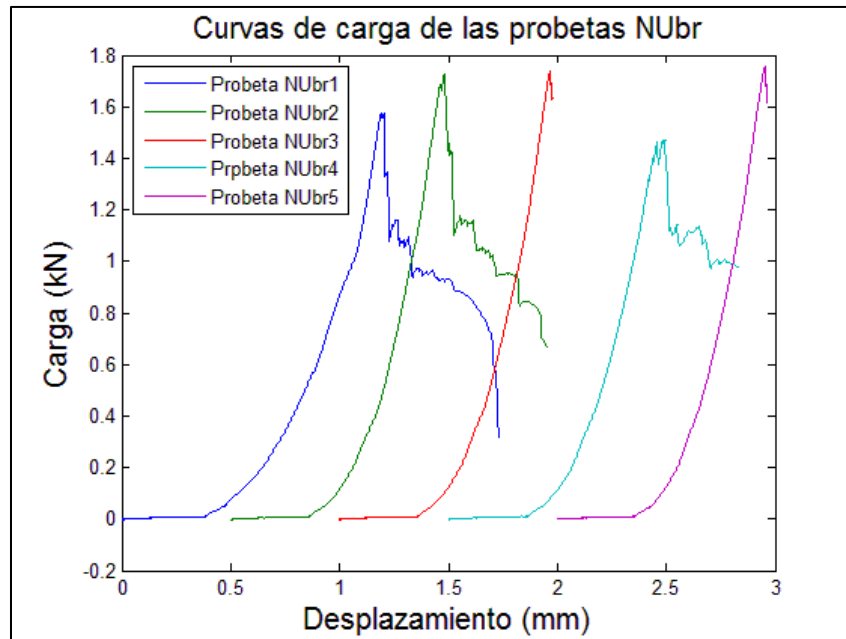


Figura 74: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote NUbr ensayadas con EA. Las curvas se encuentran desfasadas 0,5 mm por cuestiones de claridad.

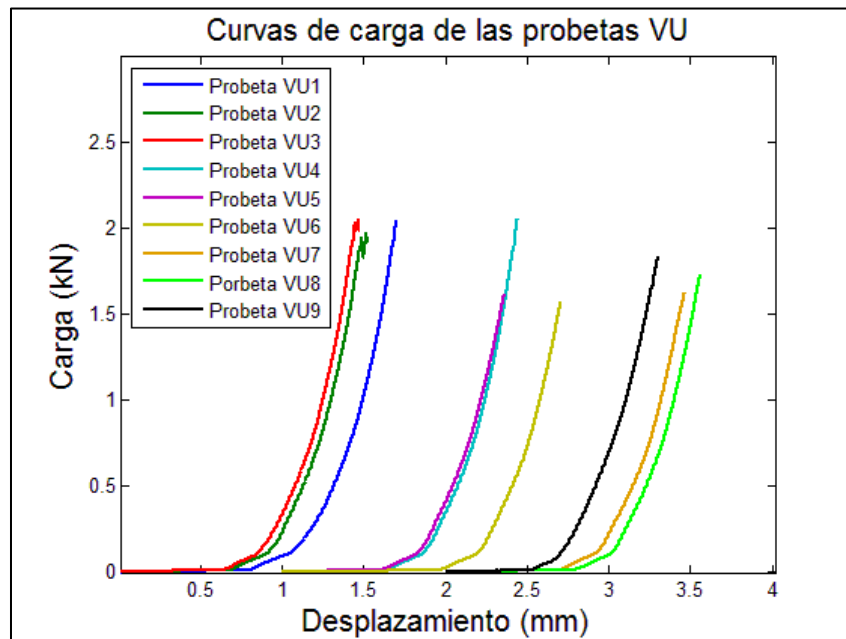


Figura 75: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote VU ensayadas con EA. Las curvas se encuentran agrupadas de a tres y desfasadas 1 mm por cuestiones de claridad. Las probetas 6, 7 y 8 fueron ensayadas hasta un 80-90% de la P_{max} promedio de las otras.

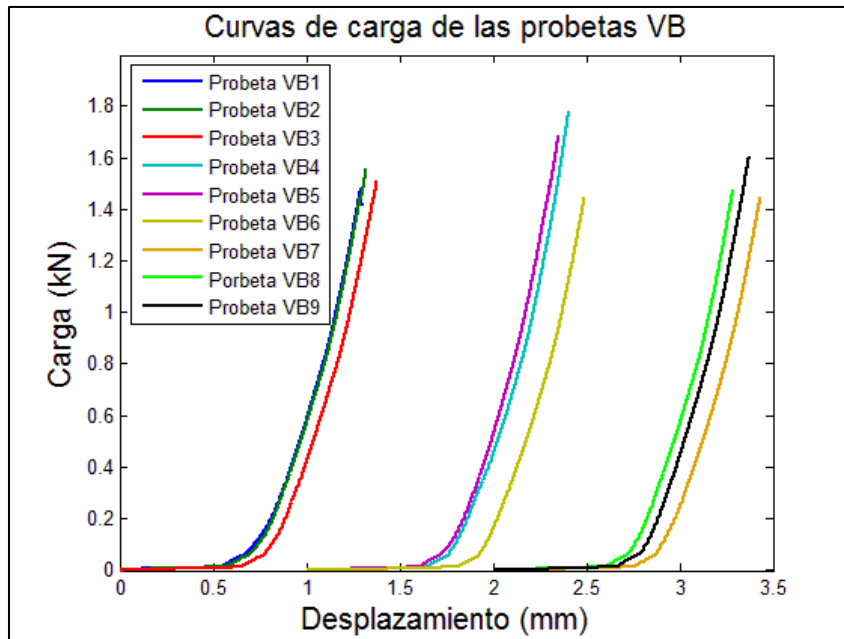


Figura 76: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote VB ensayadas con EA. Las curvas se encuentran agrupadas de a tres y desfasadas 1 mm por cuestiones de claridad. Las probetas 6, 7 y 8 fueron ensayadas hasta un 80-90 % de la P_{max} promedio de las otras.

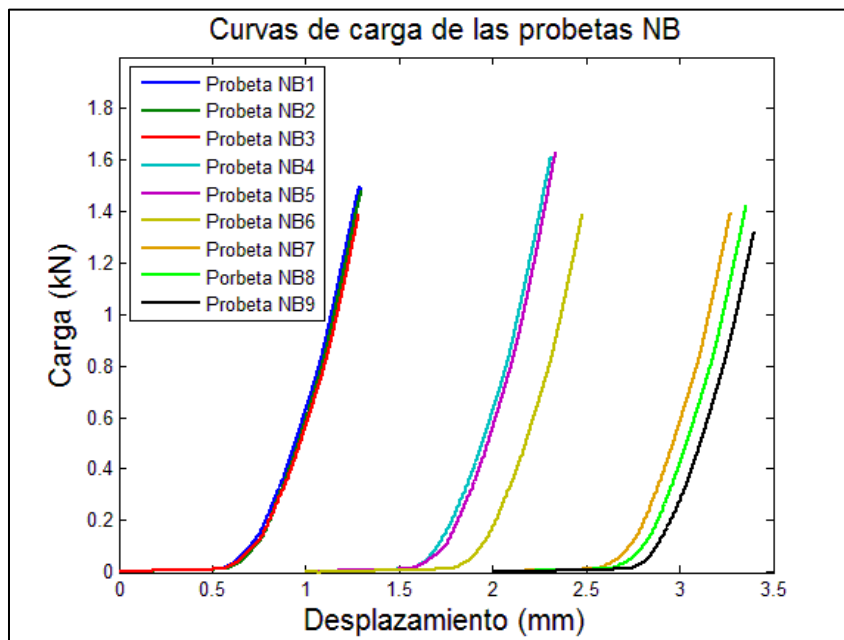


Figura 77: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote NB ensayadas con EA. Las curvas se encuentran agrupadas de a tres y desfasadas 1 mm por cuestiones de claridad. Las probetas 6, 7 y 9 fueron ensayadas hasta un 80-90% de la P_{max} promedio de las otras.

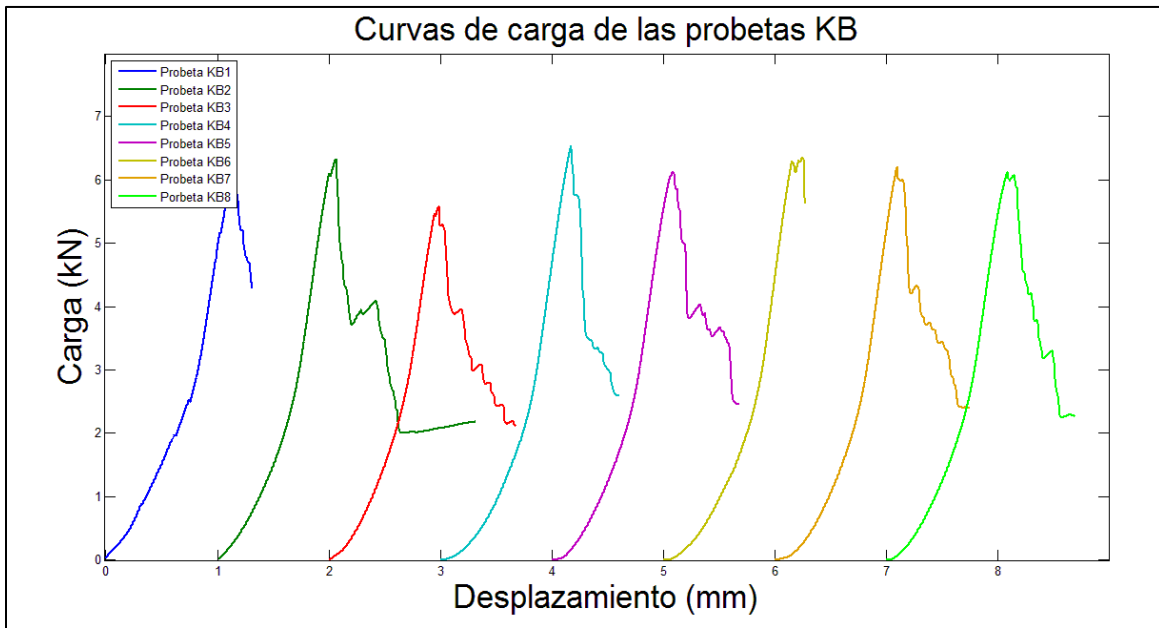


Figura 78: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote KB ensayadas con EA. Las curvas se encuentran desfasadas 1 mm por cuestiones de claridad.

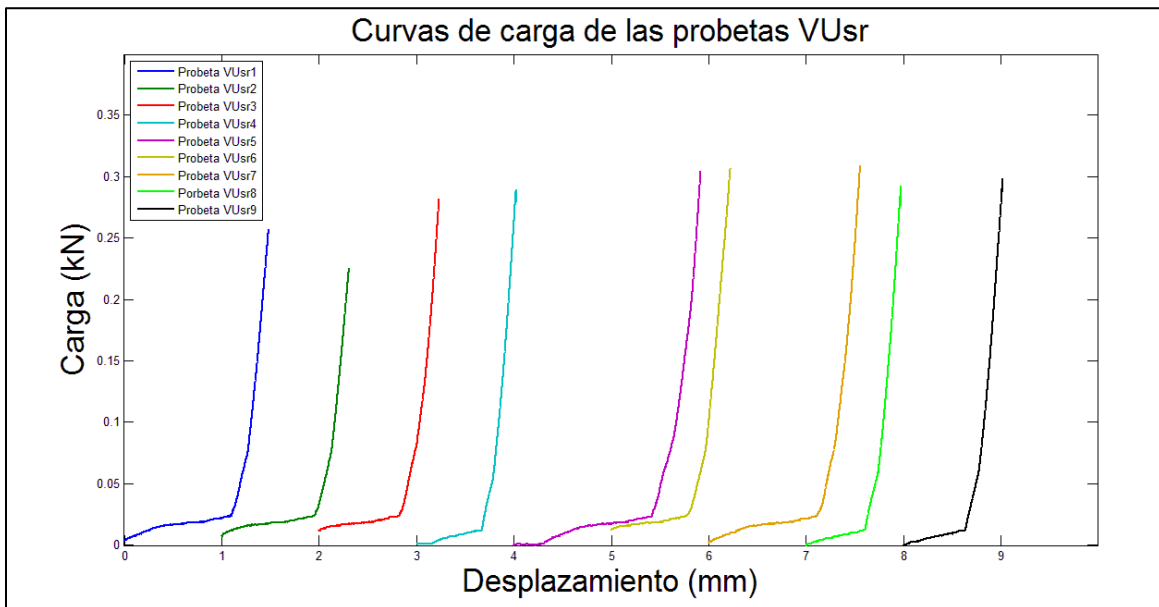


Figura 79: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas pertenecientes al lote VUsr en las que se ensayó la resistencia a la flexión de la resina. Las curvas se encuentran desfasadas 1 mm por cuestiones de claridad.

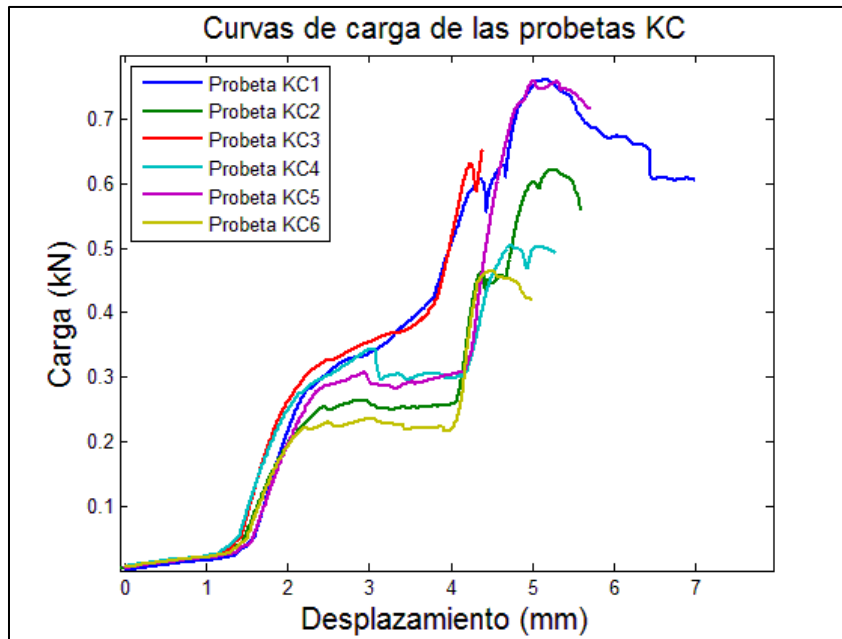


Figura 80: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas 1 a la 6 pertenecientes al lote KC ensayadas con EA.

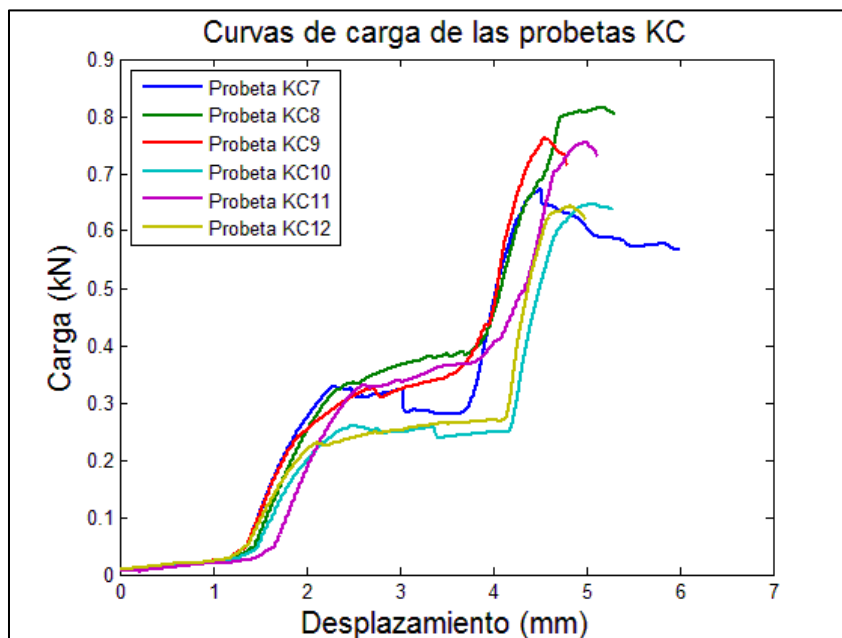


Figura 81: Curvas de carga en función del desplazamiento de las probetas 7 a la 12 pertenecientes al lote KC ensayadas con EA.

En estas imágenes se observa que las pendientes de carga de las probetas pertenecientes a un mismo lote son similares, por lo que desde el punto de vista mecánico el comportamiento a la flexión entre las probetas sigue los mismos patrones, sin apreciarse variaciones atípicas salvo en el caso de la primera probeta

ensayada sin EA debido a deslizamientos indeseados y precargas en las primeras pruebas piloto de puesta a punto del método.

Las probetas KC son las que presentan mayores diferencias en sus pendientes en la zona que se encuentra entre los 2 y los 4 mm de desplazamiento, pero más allá de esta característica el comportamiento de estas probetas es el siguiente: la carga aumenta a baja velocidad hasta aproximadamente 1,4 mm; entre 1,4 y 2 mm la pendiente crece de forma pareja en todos los especímenes y se alcanza el punto en el que la probeta queda plana respecto de las superficies de apoyo, enderezándose por acción de la carga. La zona entre 2 y 4 mm es la transición en la cual la probeta cambia su curvatura pasando de convexa a cóncava, y en la mayoría de los especímenes se presenta como un aplanamiento de la curva de carga. Más allá de los 4 mm, un nuevo cambio de pendiente más pronunciado que el primero ocurre cuando la probeta ofrece resistencia a ser doblada en contra de su curvatura natural, y finalmente se alcanza la carga máxima que desciende cuando el daño en el material compuesto no es capaz de ofrecer más resistencia a la flexión.

Salvo para el caso de las probetas del lote KB, cuyo espesor es significativamente más grande que en las otras, la carga máxima de las probetas se alcanza antes de producirse un desplazamiento total de 1 mm luego de subir la carga.

No hay diferencia entre las pendientes de las probetas ensayadas sin EA y con EA (si bien el eje de desplazamiento está en distintas escalas en las Figura 71 y Figura 73, la relación es la misma). El lote NUbr presenta esencialmente la misma pendiente inicial en su curva de carga que el lote NUar, con la sutil diferencia de tener pequeñas discontinuidades que hacen a la curva menos suave en su crecimiento. No se presentó una caída de carga con una tendencia suavizada en las probetas bidireccionales como en los trabajos de Fotouhi *et al.* [14, 73], en los que existió una diferencia marcada en el comportamiento de la carga pasado su valor máximo entre las probetas unidireccionales y las bidireccionales. Sólo en las probetas del lote KB la caída de carga tiende a ser más suavizada. Estas últimas consideraciones podrían significar que la fibra de vidrio o la resina epoxi son responsables del comportamiento suavizado en la caída de carga de probetas con estos materiales, cuando se someten a ensayos de flexión en tres puntos.

El hecho más notorio que surge del análisis de estas curvas es que en todos los casos en los que se ensayaron probetas fabricadas con material vencido se observa un codo característico ubicado cerca de la primera subida de carga, entre 0,59 y 0,81 mm después de comenzar la misma. Esto se repite también en las probetas en las que se ensayó sólo la resistencia de la resina, a longitudes de desplazamiento coincidentes de entre 0,59 y 0,81 mm, por lo que se concluye que este codo característico es producido por la pérdida de resistencia de la resina y muy probablemente está relacionado con el hecho de que el material se encontraba vencido. Estos resultados junto con los resultados de la carga máxima que se presentan más adelante respaldan la hipótesis de que en el material vencido es la resina la parte que más se deteriora y que las fibras en cambio siguen ofreciendo buenas propiedades al compuesto.

Para los análisis de la carga máxima y el SBS, en primer lugar se compararon los resultados de los ensayos que se realizaron sobre las probetas del lote NUar con y sin

EA, a fin de analizar la influencia que tuvieron los sensores piezoeléctricos en la resistencia máxima cuando se anexaron en los laterales de cada espécimen. La Tabla IV presenta los valores de las dieciocho probetas ensayadas de este lote y sus valores promedio redondeados a dos decimales.

Tabla IV: Comparación de los resultados mecánicos obtenidos en las probetas del lote NUAr sin y con EA.

Sin EA			Con EA		
Probeta número	P_{max} (kN)	SBS (MPa)	Probeta número	P_{max} (kN)	SBS (MPa)
1	1,43	35,52	1	1,66	45,05
2	1,90	51,38	2	1,99	51,84
3	1,73	43,99	3	2,15	56,15
4	2,07	52,52	4	2,30	57,97
5	1,95	47,29	5	2,16	53,34
6	2,03	52,73	6	2,04	51,50
7	2,13	54,47	7	1,96	48,85
8	2,12	52,78	8	1,75	46,62
9	1,91	49,66	9	2,19	56,94
Promedio	1,92	48,93	Promedio	2,02	52,03
Desviación estándar	0,22	5,98	Desviación estándar	0,21	4,56
Coefficiente de variación (%)	11,60	12,23	Coefficiente de variación (%)	10,34	8,77

Los resultados de la carga máxima y el SBS promedio difieren en 0,11 kN y 3,1 MPa respectivamente, lo que representa un aumento del 5,21 % en los valores de carga y un 6,34 % en los valores de SBS. Como estos valores están por debajo del coeficiente de variación propio de cada uno de los casos estudiados se considera que la influencia de los sensores piezoeléctricos anexados a cada lado de las probetas por medio del dispositivo de soporte confeccionado no es significativa, y por lo tanto no modifica los resultados promediados de la carga máxima y el SBS.

Se observó que en las dos primeras probetas de cada caso la P_{max} dio valores inferiores al resto de sus compañeras. Esto pudo deberse a que la nariz de carga no las flexionó justo en su centro o de forma pareja a lo largo de su ancho, como se observó posteriormente por inspección visual finalizados los ensayos (Figura 82a y Figura 82b). De cualquier manera, se realizó un análisis estadístico con el método de los residuos normados máximos y el valor crítico del tamaño de muestra y se comprobó que ninguno de los valores particulares de estos ensayos (ni de los posteriores) puede considerarse atípico.

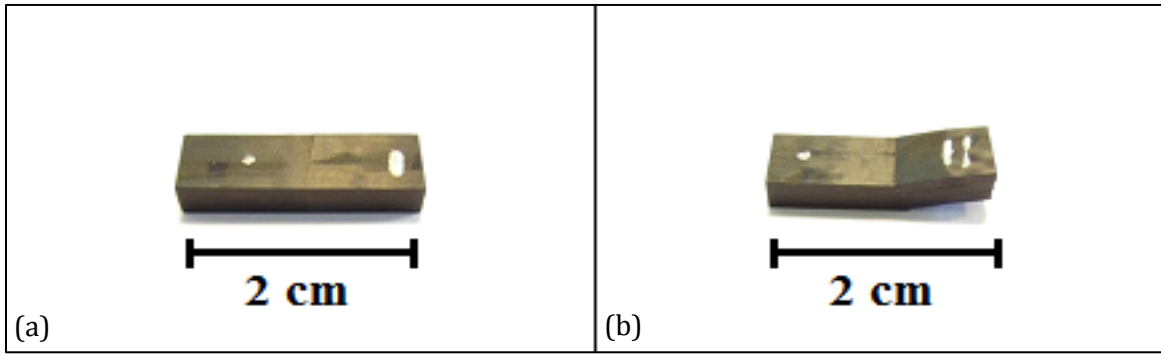


Figura 82: (a) Probeta NUar_{SEA}1 flexionada de forma despareja a lo largo de su ancho.
 (b) Probeta NUar_{CEA}1 flexionada de forma despareja en la dimensión de su largo.

Asimismo, en la Tabla V se comparan las probetas del lote VU_{sr}, con dos de ellas ensayadas sin EA y las otras siete ensayadas con los instrumentos de EA.

Tabla V: Comparación de los resultados mecánicos obtenidos en las probetas del lote VU_{sr} sin y con EA.

Sin EA			Con EA		
	P_{max} (kN)	SBS (Mpa)		P_{max} (kN)	SBS (Mpa)
Promedio de 2 probetas	0,29	8,41	Promedio de 7 probetas	0,30	8,38
Desviación estándar	0,01	0,80	Desviación estándar	0,01	0,21
Coefficiente de variación (%)	5,02	9,49	Coefficiente de variación (%)	3,42	2,49

En este caso, la diferencia entre los valores de P_{max} es de 0,01 kN, y representa un aumento del 3,45 % en la carga y una disminución del 0,36 % en el SBS. De nuevo, estos valores están por debajo del coeficiente de variación propio del caso sin EA y se concluye que el dispositivo de EA no influye significativamente en los valores de la resistencia máxima a la flexión de las probetas.

Los resultados promedio de la carga máxima y el SBS de todos los lotes ensayados con EA se presentan en la Tabla VI.

Tabla VI: Comparación de los resultados mecánicos de todos los ensayos.

Lote de probetas	P_{max} promedio (kN)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	SBS promedio (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
NUar	2,02	0,21	10,34	52,03	4,56	8,77
NUbr	1,65	0,12	7,54	49,53	3,90	7,87
VU	1,93	0,17	9,01	56,23	3,42	6,09
VB	1,60	0,11	6,94	48,39	1,60	3,31
NB	1,51	0,10	6,51	48,68	2,34	4,80
KB	6,16	0,29	4,65	32,76	1,17	3,58
KC	0,67	0,11	16,03	13,06	2,02	15,46
VU _{sr}	0,30	0,01	3,69	8,39	0,34	4,00

En la tabla se observa que la diferencia entre las cargas máximas promedio de las probetas del lote NUar y el lote NUbr es de 0,37 kN, lo que representa una disminución del 18,32 % (fuera del coeficiente de variación propio de cada lote). Como es lógico para probetas de dimensiones similares el valor del SBS promedio también es menor en el lote de baja resistencia (2,5 MPa menos), representando una disminución del 4,8 %. La razón de esta disminución del 18,32 % en el valor de la P_{max} podría deberse al estado específico del material que se utilizó en el momento de fabricación del laminado o a la dispersión propia de los diferentes lotes de producción de laminados que se fabrican para el proyecto aeroespacial en el que se utilizan.

Luego se observa que la diferencia entre las cargas máximas de las probetas del lote NUar y el lote VU es de sólo 0,09 kN (4,46%), y que el SBS resulta ser mayor en el lote fabricado con materia prima vencida (4,2 MPa u 8,07% superior). De lo anterior se desprende que el material fabricado con pre impregnados vencidos podría continuar siendo útil en aplicaciones específicas y que es apto para realizar una recalificación de sus propiedades, pudiéndose considerar (a los fines y el alcance de esta tesis) a las probetas del lote VU como parte de la dispersión de las probetas del lote NUar. Esto último también es válido para las probetas de los lotes VB y NB, en las que la carga máxima de las probetas fabricadas con material vencido resultó ser mayor que en las probetas fabricadas con material nuevo, casualmente con una diferencia entre valores promedio idéntica a la anterior (0,09 kN).

Las ligeras diferencias entre los espesores promedio de cada lote (Tabla II) juegan un papel en estos resultados, ya que del espesor se desprenden las demás dimensiones de los especímenes y la separación entre los puntos de apoyo. Por esto los valores de SBS, que además de la carga máxima dependen del espesor y del ancho, pueden comportarse de manera inversa a la carga máxima cuando se hace la comparación entre los lotes fabricados con materia prima vencida y los lotes fabricados con materia prima nueva. Esto es evidente en la Ecuación 9, en donde especímenes más pequeños tendrán un valor de SBS más alto, por más que la carga máxima sea levemente inferior a la de los especímenes más grandes.

Las probetas bidireccionales presentan menor resistencia máxima que las probetas unidireccionales debido a que las capas orientadas a 90° tienen las fibras orientadas en la dirección paralela a la carga y no aportan a la resistencia del laminado más allá de su matriz. Las probetas del lote KC presentan los valores más pequeños de P_{max} y SBS debido a que, además de tener el menor espesor de todos, tienen la mayoría de las fibras orientadas a 45° y no ofrecen su resistencia máxima a la flexión. También influye el hecho de que el proceso de filament winding es más propenso a generar porosidades en los laminados que el proceso de laminación manual con pre impregnados [1]. Las probetas del lote KB tienen la mayor resistencia de todos los lotes porque, si bien son laminados [0/90]_s, sus dimensiones son significativamente mayores que las de las probetas que están fabricadas con fibra de carbono y cianato éster.

Los valores de resistencia máxima de las probetas NUar y VU están dentro de los valores esperados para probetas de CFRP en ensayos de flexión en tres puntos, basándose en los valores de 2,33; 2,55; 2,29 y 1,89 kN obtenidos por Martínez-Jequier

et al. [20] sobre probetas unidireccionales de 4,22 mm de espesor y 260 x 40 mm de largo y ancho respectivamente (los últimos dos valores en muestras pre delaminadas).

5.3 RESULTADOS DE EA

Los datos registrados con el método de EA ofrecen la posibilidad de estudiar las curvas de carga comparadas con la evolución de cualquier parámetro almacenado por el sistema en base a los hits detectados en cada momento del ensayo, por lo que la variedad y posibilidades de combinación de gráficos son muy extensas. Por esta razón, se presentarán y estudiarán los resultados de los parámetros que por la literatura y por las experiencias obtenidas al analizar los datos en este trabajo se consideran los más relevantes y aportan a las conclusiones de la tesis.

Se estudiarán: la actividad de EA (número de hits acumulados), las cuentas (acumuladas y sin acumular), la energía MARSE y la amplitud.

Los gráficos de estos parámetros incluyen por igual a los hits de ambos canales, sin haberse analizado los gráficos de cada canal por separado, debido a que las dos señales son importantes para el estudio del comportamiento de los especímenes y presentaban resultados equivalentes entre sí. Asimismo, el ruido electrónico introducido a través de la salida “parámetro externo” de la máquina de ensayos SHIMADZU hasta la entrada del equipo de EA PAC se presenta sin filtrar, debido a que si bien los filtrados mejoran la parte tardía de la curva de carga (parte que, con las curvas limpias proporcionadas por la salida directa de la máquina SHIMADZU, se acaba poco después de la P_{max} , sin permitir visualizar la carga estática y la descarga), distorsionan su comienzo, y pueden llegar a mostrar interpretaciones incorrectas del comportamiento de la carga en esta zona (Figura 84).

5.3.1 Lote NUar

En estos ensayos se estudiaron distintos comportamientos de la carga luego de alcanzarse la P_{max} : por un lado, cuando en la probeta no se producía una caída rápida de carga del 60% y por lo tanto la nariz continuaba flexionando a la probeta durante más tiempo que en el caso de producirse la caída abrupta; por otro lado, cuando la carga se dejaba estática por un periodo de tiempo de aproximadamente 1 minuto y después se descargaba a una velocidad de 0,5 mm/min ó 20 mm/min, esperando otro minuto tras quedar la carga en cero.

El comportamiento típico de una probeta que presenta una caída de carga abrupta luego de alcanzar la P_{max} se observa en la Figura 83, en donde se estudia la actividad de EA en función del tiempo.

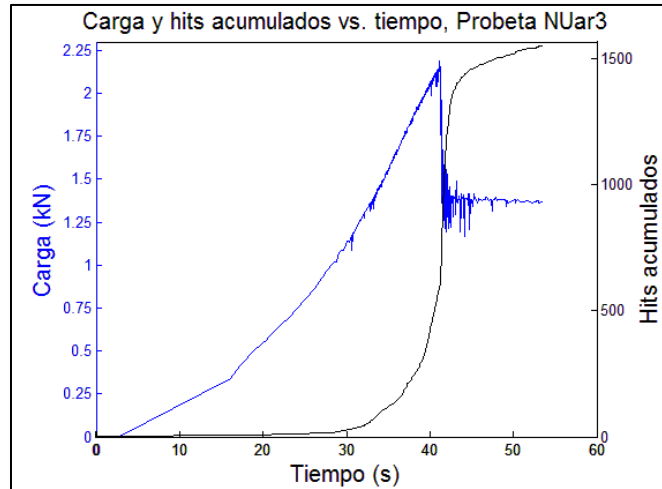


Figura 83: Forma típica de la actividad de EA en una probeta con caída de carga abrupta.

Esta forma típica de los hits acumulados en función del tiempo será considerada la curva característica de la actividad de EA a partir de ahora. El mismo gráfico, pero con un filtro de ruido aplicado en la curva de carga, se observa en la Figura 84. La relación de compromiso entre el grado de filtrado y el mantenimiento de la proporción de la curva en los primeros valores, condujo a optar, siempre que no hubiera una mejor opción, por presentar los valores de la carga sin filtros.

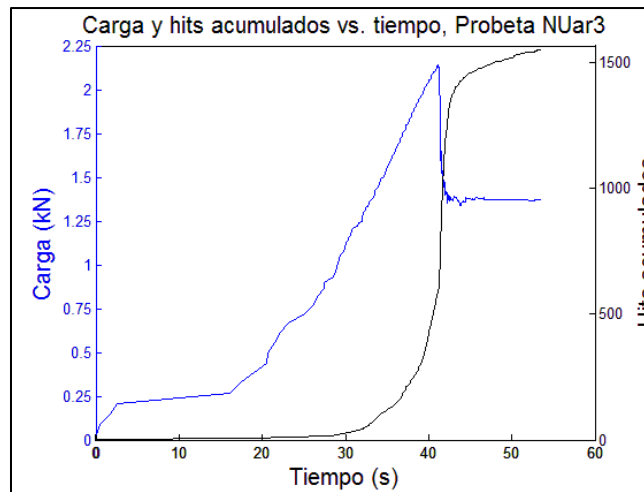


Figura 84: Curva de carga filtrada para eliminar el ruido electrónico de los equipos. Debido a la distribución despareja de la densidad de puntos de medición entre la parte temprana y tardía de la curva, la proporción de subida de la carga en los primeros valores no se pudo mantener sin desmejorar la calidad del filtrado.

La actividad de EA se inicia en etapas tempranas de la carga y comienza a elevarse siguiendo la curva característica hasta alcanzar su pendiente máxima en el momento en que se produce la P_{max} . Tras pasar este punto la pendiente comienza a disminuir y durante la carga estática el crecimiento es continuo a una pendiente bastante estable que con el tiempo se aproxima a cero. Cabe mencionar que un aumento significativo y

de gran pendiente en la actividad de EA también significa que existieron más eventos en ese periodo de tiempo respecto de los momentos en los que la pendiente es menor.

En el caso de que la carga no presente una caída abrupta y la nariz siga flexionando a la probeta por más tiempo hasta detenerse, la forma típica de la actividad de EA es la que se observa en la Figura 85.

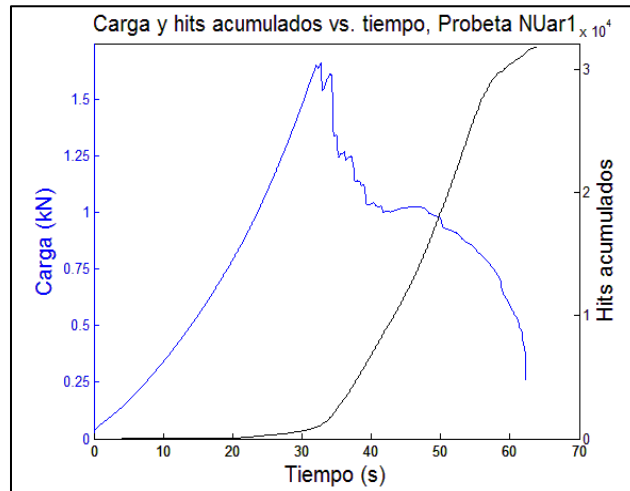


Figura 85: Forma típica de la actividad de EA en una probeta con caída de carga gradual.

En este caso, al momento de la P_{max} la pendiente de la curva se eleva y se mantiene hasta casi finalizar la carga pero no se alcanza un escalón vertical como en el caso anterior, sino que la curva se aplana y el punto de inflexión se encuentra alejado de la P_{max} .

Un ejemplo de estos dos comportamientos se observa en la Figura 86, en donde la probeta sufrió dos cargas con caída abrupta y una con caída gradual, reflejándose los dos tipos de comportamientos en la actividad de EA.

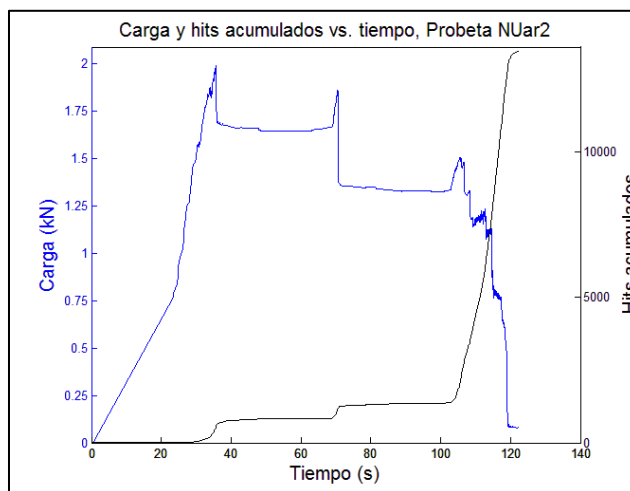


Figura 86: Comportamiento de la actividad de EA durante las sucesivas cargas y descargas de una probeta unidireccional.

El comportamiento de la actividad de EA durante la carga estática y a diferentes velocidades de descarga se observa en la Figura 87.

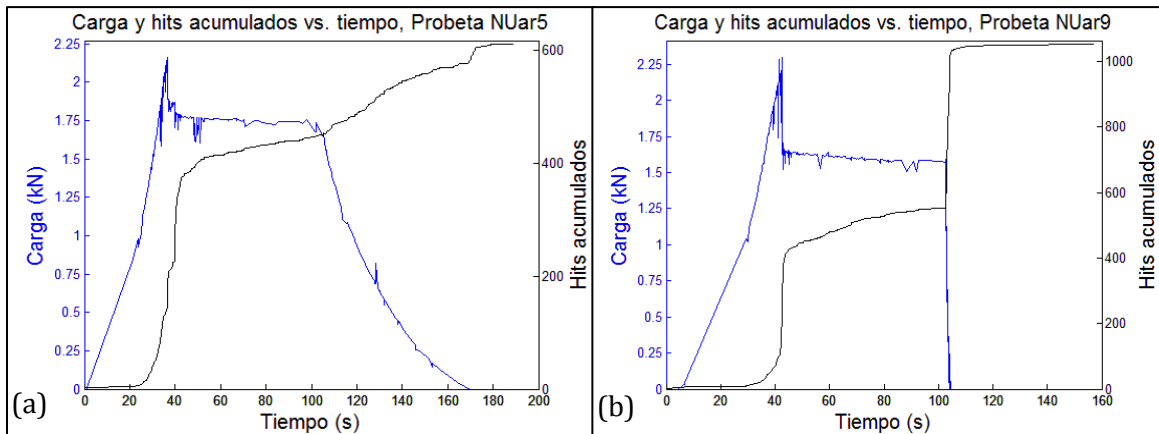


Figura 87: Comportamiento de la actividad de EA durante la carga estática y la descarga a velocidad lenta (a) o rápida (b).

Como ya se mencionó durante la carga estática el crecimiento de la actividad de EA es continuo a una pendiente bastante estable que con el tiempo se aproxima a cero; durante la descarga a una velocidad lenta (Figura 87a), la pendiente se eleva y el comportamiento se asemeja al de una caída de carga gradual (curva característica muy aplanada), mientras que en la descarga a una velocidad rápida (Figura 87b) se presenta un escalón o forma característica cuadrada.

Si bien la actividad de EA es un parámetro general que no pondera el número de cuentas ni la amplitud de los hits detectados, estos gráficos corroboraron que frente a las mismas condiciones de carga la tendencia acumulada de los hits se comporta de forma muy parecida entre las probetas, al igual que lo expuesto por Paipetis *et al.* [40] en su trabajo.

Analizando las cuentas acumuladas, el comportamiento típico de una probeta con caída de carga abrupta se observa en la Figura 88.

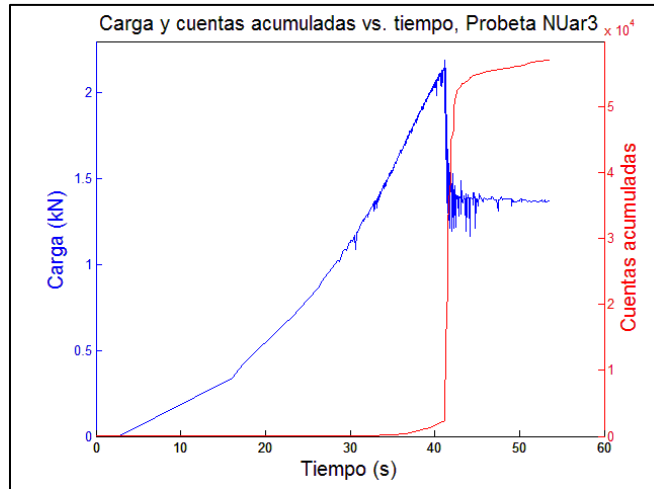


Figura 88: Cuentas acumuladas en función del tiempo a lo largo de la carga de una probeta del lote NUar.

Este parámetro es más representativo que el de la actividad de EA porque sólo pondera las cuentas de los hits y discrimina los otros parámetros. La diferencia entre las curvas de hits acumulados y cuentas acumuladas es que esta última presenta cambios de pendiente más pronunciados y abruptos en el momento de alcanzarse la P_{max} , y por lo tanto es mejor indicador del suceso; además, en este caso las partes anterior y posterior a la P_{max} tienen pendientes menores, y el inicio del crecimiento de la curva es más tardío.

En el caso de una caída de carga gradual, la cantidad de hits posteriores a la P_{max} generan un crecimiento constante con un comportamiento general suavizado (Figura 89a), pero haciendo un acercamiento en la zona de la P_{max} , se mantiene el salto de pendiente abrupto característico de las probetas con caída rápida (Figura 89b).

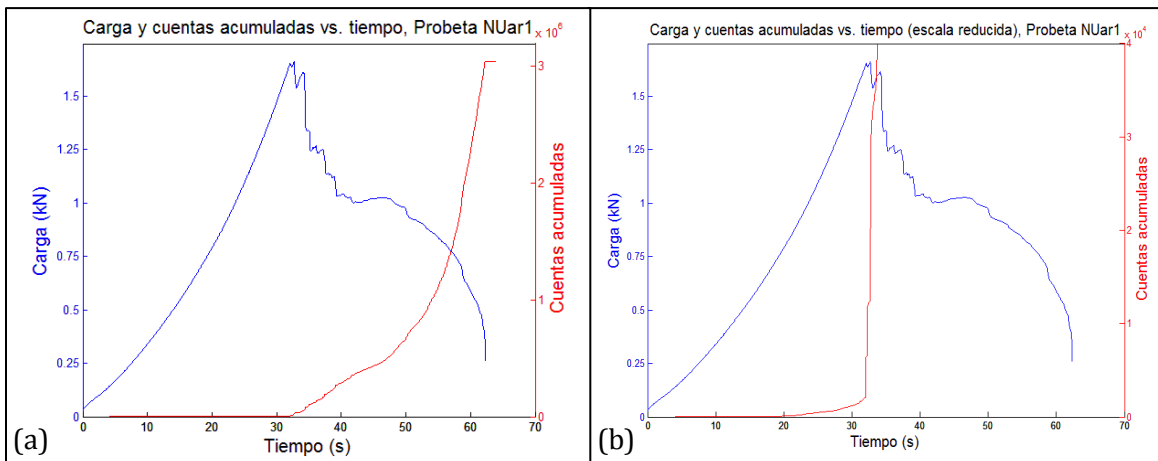


Figura 89: Comportamiento de las cuentas acumuladas durante una caída de carga gradual. En la parte (b) se puede observar un aumento en la escala vertical de las cuentas que revela que el salto abrupto en el momento de alcanzarse la carga máxima se mantiene.

Los demás comportamientos estudiados se resumen en las figuras 90 y 91.

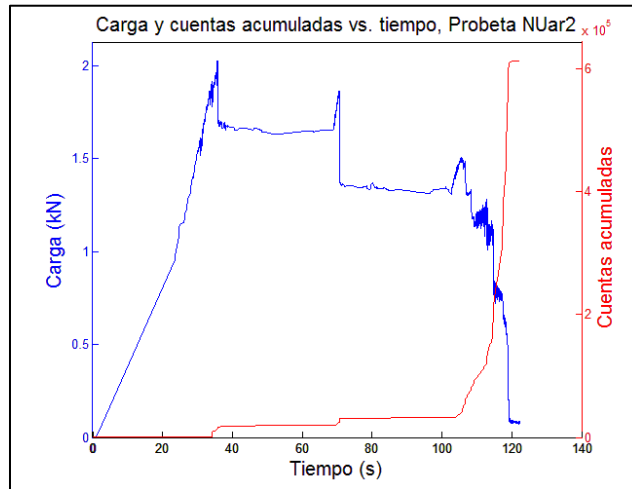


Figura 90: Diferentes comportamientos de las cuentas acumuladas durante sucesivas cargas.

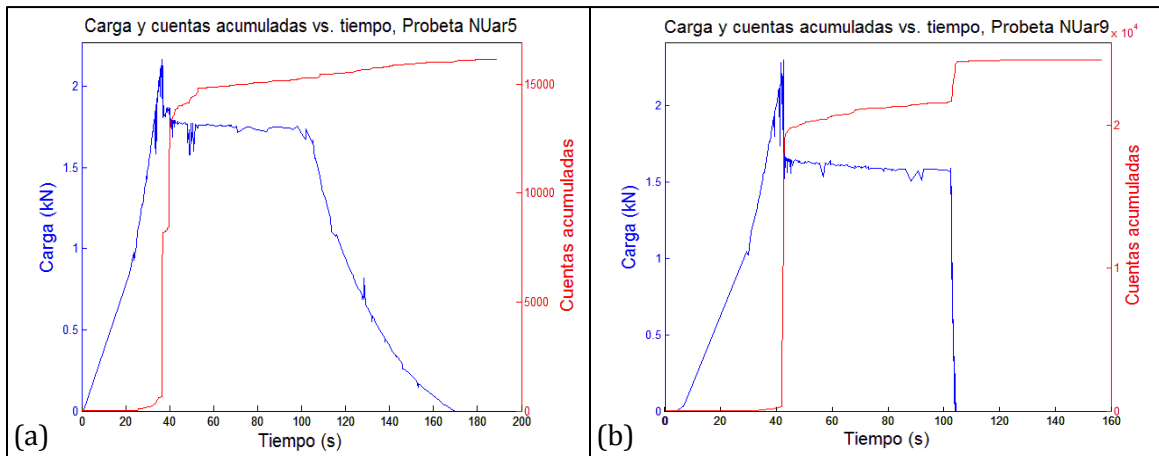


Figura 91: Diferentes comportamientos de las cuentas acumuladas durante la carga estática y la descarga a velocidad lenta (a) o rápida (b).

Se observa que al iniciarse una descarga lenta el cambio de pendiente se evidencia con un escalón muy pequeño, mientras que a descarga rápida el cambio de pendiente es mucho más pronunciado.

En todos los casos (las nueve probetas del lote), los cambios de pendiente notables siempre están relacionados a las caídas de carga que se producen en la P_{max} y posteriores, y también al comienzo de la descarga (cuando el material es liberado de la presión que ejerce la nariz de carga sobre el mismo).

Para analizar con mayor precisión el momento en el que la pendiente en la curva de las cuentas acumuladas comienza a crecer, se estudia el gráfico de la evolución de las cuentas individuales sin acumular.

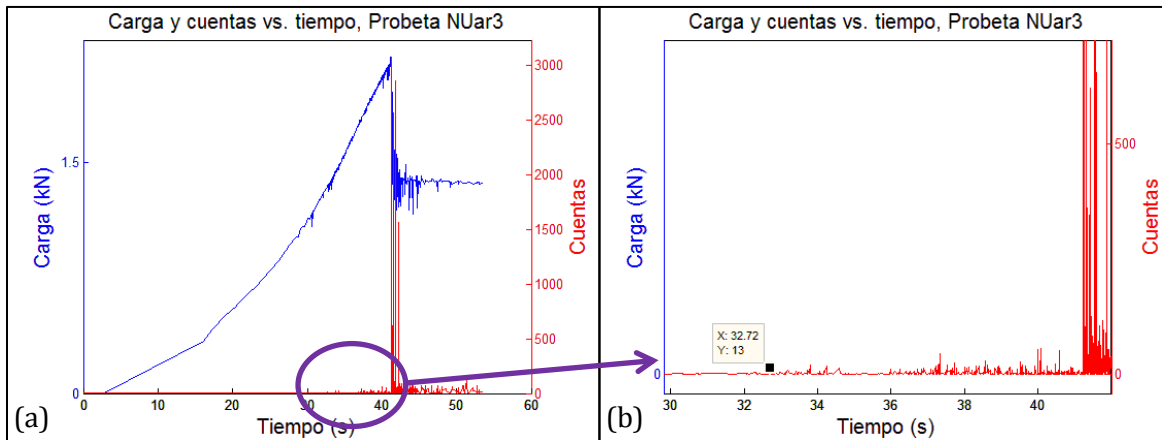


Figura 92: Evolución de las cuentas sin acumular a lo largo de la carga de una probeta. En la parte (a) se marca la zona en la que comienzan los daños menores, y en la parte (b) se hace un aumento de dicha zona para apreciar el primer hit con cuentas mayores a 10.

De esta manera es posible identificar los primeros picos significativos que aportan al crecimiento de las cuentas acumuladas (típicamente el primer hit con un número de cuentas mayor a 10), e indican el comienzo de los daños menores en el material. En este lote de probetas, el comienzo de estos primeros picos que inician el crecimiento de las cuentas acumuladas se encontró en promedio al alcanzar el 47,5 % (± 15) de la P_{max} , con un mínimo del 30 % en la probeta número 8 y un máximo de 62,8 % en la probeta número 3 (estudio resumido más adelante en la sección 5.4).

Analizando la energía MARSE, se encontró que la misma es el mejor indicador de los daños mayores y más relevantes, como el daño que se desata en la P_{max} (probablemente rotura de las fibras) o, en algunos casos, milésimas de segundo antes, y los daños que se producen en las caídas de carga (debilitamiento del material por alguna rotura). Estos comportamientos se observan en la Figura 93.

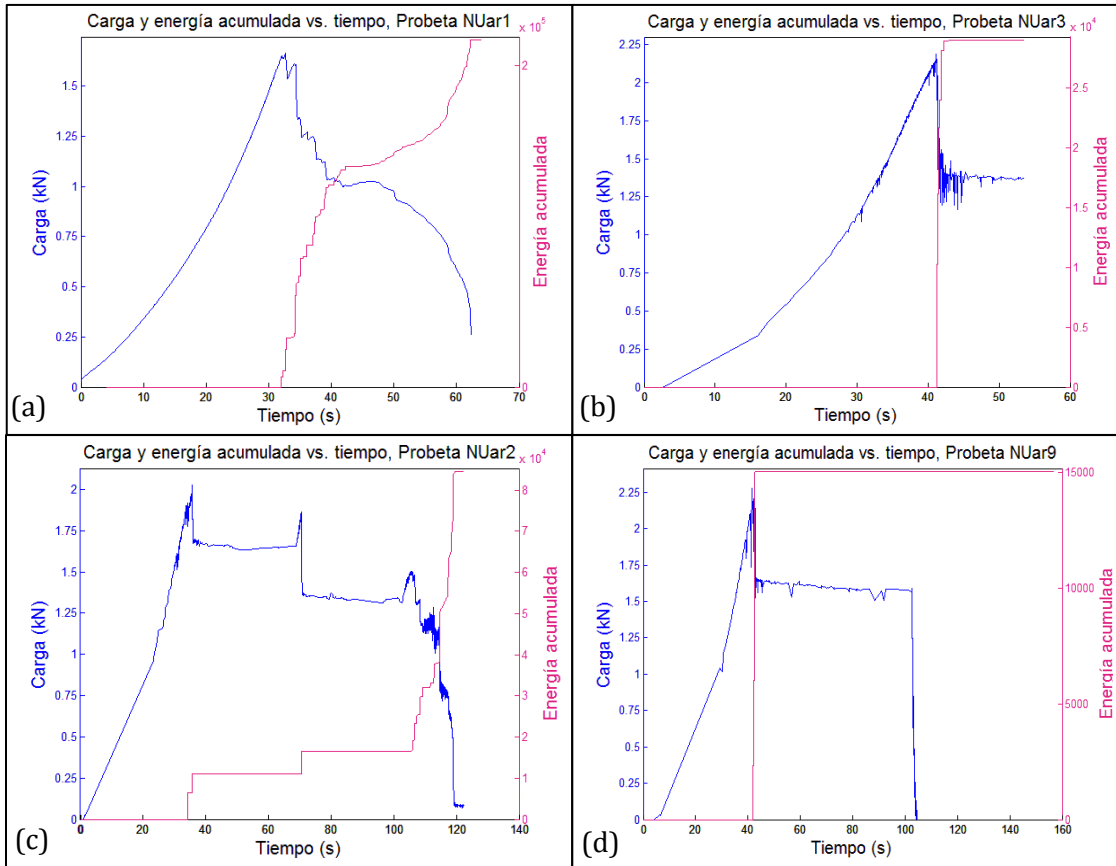


Figura 93: Gráficos de la energía MARSE acumulada (cuentas) durante las pruebas de flexión de viga corta de diferentes probetas del lote NUar.

Este parámetro no es sensible a la descarga de las probetas, ni a los daños menores, siendo su valor menor a 0,5 en estos casos, por lo que la placa de adquisición de datos lo considera cero. En otras palabras, cuando los hits no se deben a eventos mayores como los que se producen al caer la carga, su energía es despreciable para la resolución con la que trabaja la placa. Por estos motivos se consideró a la energía MARSE como el parámetro indicador de la P_{max} en los laminados planos.

A grandes rasgos, la amplitud de los hits a lo largo del tiempo mostró concentraciones en las zonas de las caídas de carga y al comienzo de la descarga, con valores elevados en el primer caso y más moderados en el segundo. Previo a la P_{max} , los hits parecen tener una tendencia aparente a incrementar su amplitud con el tiempo, pero tras analizar puntualmente y estadísticamente este parámetro se demostró que esta tendencia no es concluyente. Si la caída de carga es abrupta, la concentración en el tiempo es corta, y se pasa al comportamiento de carga estática muy pronto. Si la caída de carga es gradual, los hits se presentan muy juntos en el tiempo y con amplitudes de valor elevado durante esta etapa, algunos con amplitudes del mismo orden que en el momento de la P_{max} . Durante la carga estática, los hits posteriores a la P_{max} tienen una amplitud moderada intermedia mayor que los que se producen en la etapa de carga, y están menos agrupados en el tiempo. Finalmente, durante la descarga los hits vuelven a concentrarse y sus amplitudes suelen ser

menores que en la carga estática, luego del pico que se produce en el inicio de la descarga, y suelen tener una tendencia a disminuir con el tiempo una vez que la nariz de carga deja de hacer contacto con la probeta.

Estos comportamientos se observan en la Figura 94.

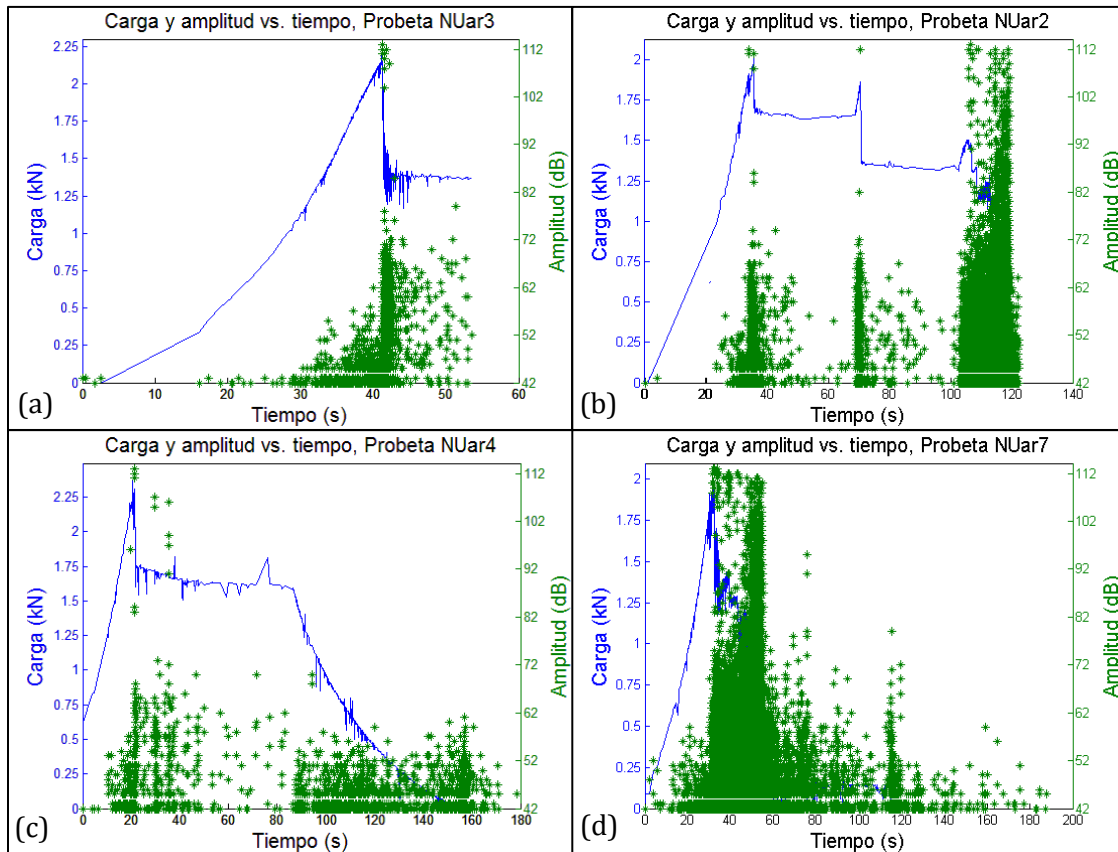


Figura 94: Gráficos del comportamiento de la amplitud durante las pruebas de flexión de viga corta de diferentes probetas del lote NUAr.

Se estudió además el porcentaje de la P_{max} en la que ocurría el primer hit con una amplitud mayor o igual a 50, 55, 60 y 65 dB, obteniendo que el primer hit con amplitud mayor a 50 dB ocurrió en promedio al alcanzar el 48,2 % ($\pm 22,7$) de la carga máxima (análisis resumido más adelante en la sección 5.4).

Graficando los parámetros de la carga, la amplitud y las cuentas en función del tiempo en un mismo gráfico, se puede observar la correlación entre estos parámetros durante todo el historial de la carga. Prácticamente, la principal utilidad de este tipo de gráficos es orientar visualmente sobre estas correlaciones, pudiendo comparar, por ejemplo, las cuentas de un hit con su amplitud, u observar cómo influye cada uno de estos parámetros en el acumulado de cuentas, pero como analizándolos por separado se llega a las mismas conclusiones, no se presentarán más gráficos de este estilo además de los colocados a modo de ejemplo a continuación en las figuras 95 y 96.

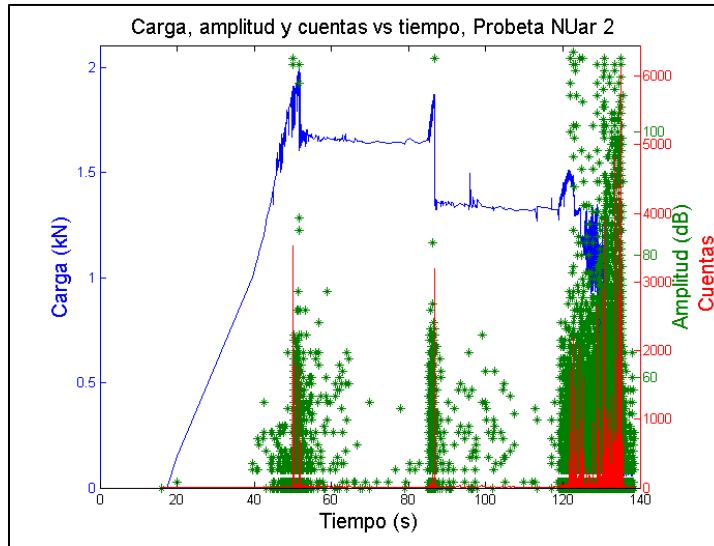


Figura 95: Carga, amplitud y cuentas sin acumular en función del tiempo en una probeta del lote NUAr que sufrió tres ciclos de carga.

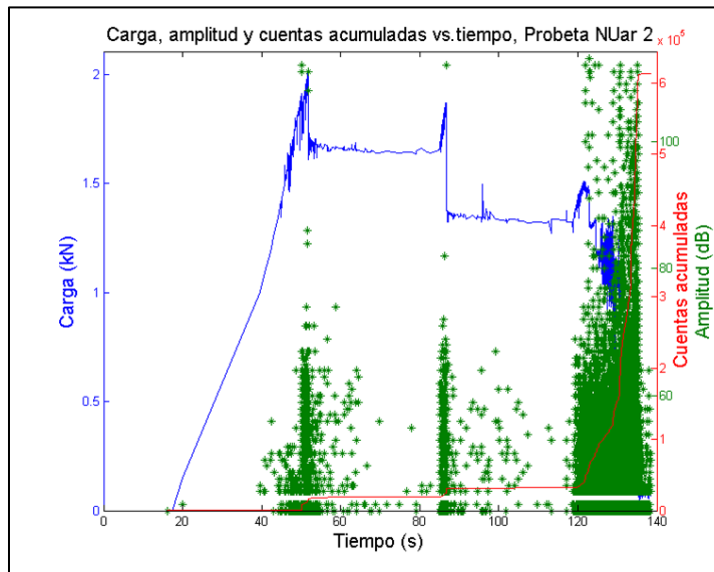


Figura 96: Carga, amplitud y cuentas acumuladas en función del tiempo en una probeta del lote NUAr que sufrió tres ciclos de carga.

5.3.2 Lote NUbr

La actividad de EA siguió los mismos patrones que en el caso del lote NUAr. Se observaron las mismas curvas características en las caídas de carga abruptas y graduales, crecimiento constante de baja pendiente durante la carga estática, y cambios de pendiente más o menos abruptos dependiendo de la velocidad en las descargas (Figura 97).

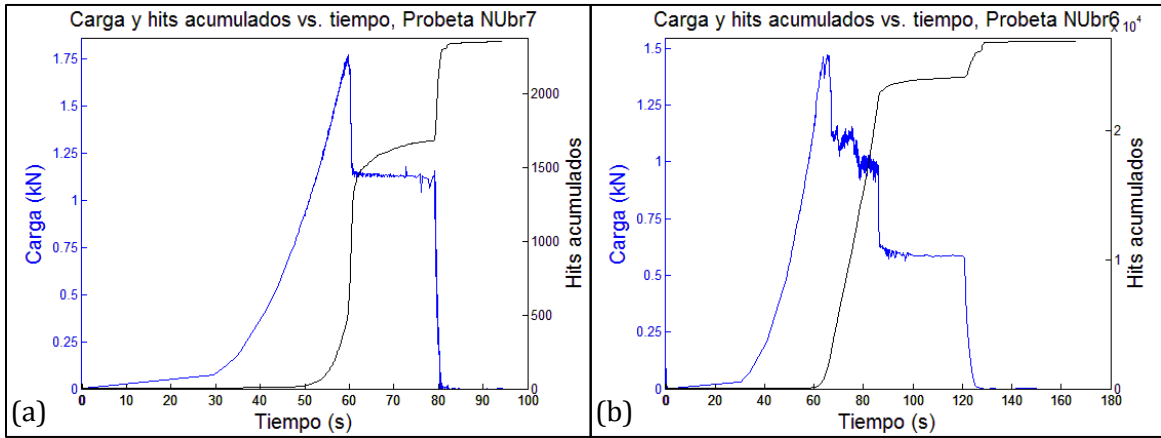


Figura 97: Comportamiento de la actividad de EA en probetas del lote NUbr.

En las curvas de las cuentas acumuladas, se observaron los mismos comportamientos que en el lote anterior, con las curvas menos suavizadas y aplicándose las mismas conclusiones (Figura 98).

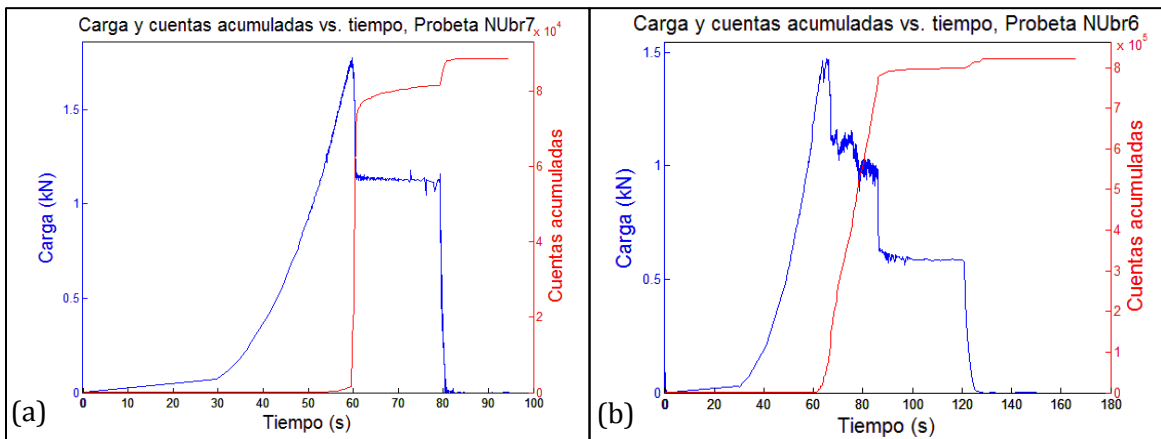


Figura 98: Comportamiento de las cuentas acumuladas en probetas del lote NUbr.

El análisis de la evolución de las cuentas sin acumular mostró que el comienzo del crecimiento en la curva de las cuentas acumuladas (relacionado al comienzo de los daños menores) se presentó en promedio al alcanzarse el 37 % ($\pm 13,5$) de la P_{max} , con un mínimo en 16,4 % para la probeta 1 y un máximo de 53,2 % para la probeta 5 (resumen en la sección 5.4).

La energía en este lote se comportó como en los lotes anteriores, revelando solamente los eventos mayores en los momentos en que se presentaron caídas de carga.

La amplitud presentó los mismos comportamientos que el lote anterior, en la región previa a la P_{max} , durante la caída de carga (gradual o abrupta), y en la descarga. En la Figura 99 se observan estos comportamientos.

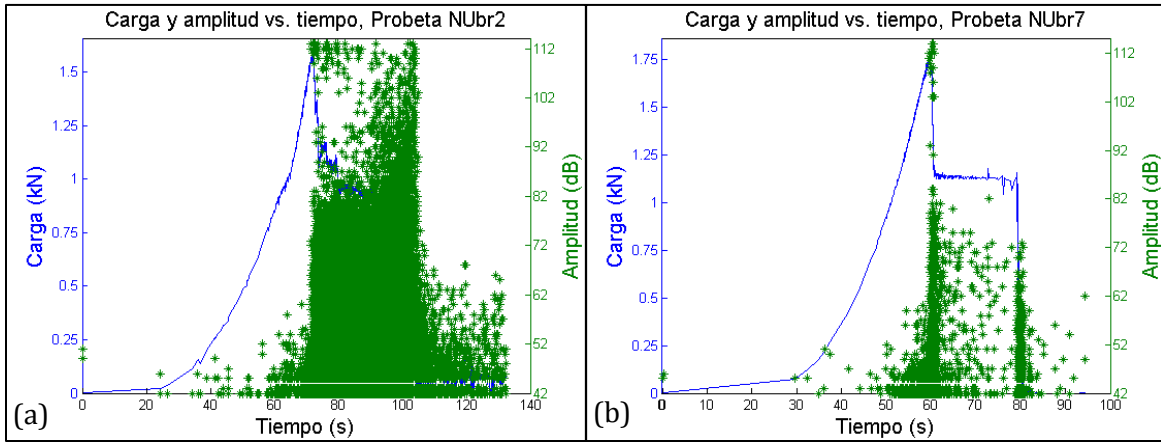


Figura 99: Comportamiento de la amplitud de los hits en probetas del lote NUbr.

5.3.3 Lote VU

Las probetas de este lote se dividen en dos: probetas que se ensayaron hasta la rotura y probetas que se ensayaron hasta el 90 % de la carga máxima promedio de las que sí rompieron. Todas las probetas de este lote que sufrieron el ciclo de carga completo rompieron de forma abrupta, sin caídas graduales de la misma. Los mismos patrones para las distintas etapas de carga que en los lotes anteriores se cumplen en estas probetas, y los casos más notorios son los de la probeta 2, que sufrió un evento abrupto después de alcanzar la P_{max} y que genera un aumento escalonado de la actividad de EA (Figura 100a), y el de la probeta 9, que presenta un evento anterior a la P_{max} que genera un cambio de pendiente marcado e interrumpe el crecimiento suavizado de la curva característica (Figura 100b).

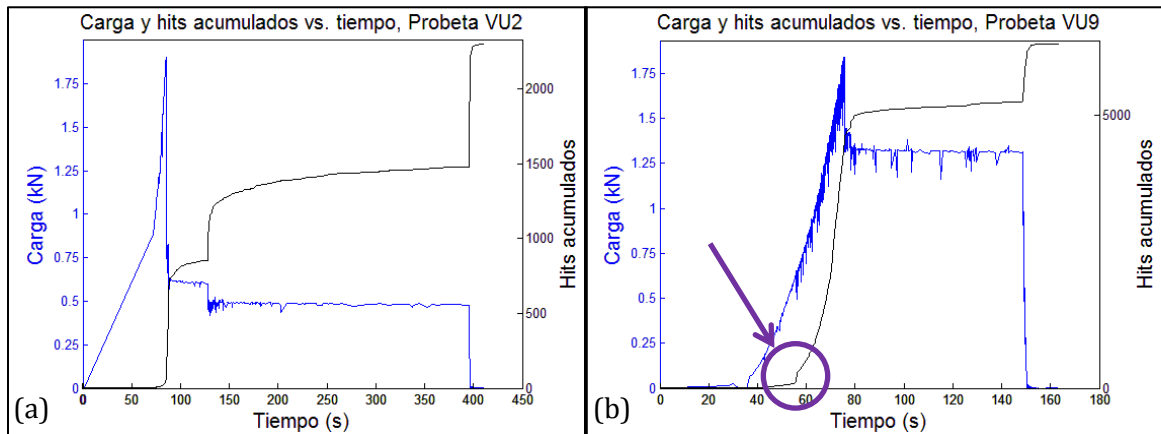


Figura 100: Comportamiento de la actividad de EA en probetas del lote VU. En la probeta VU9 se observa un evento anterior a la P_{max} que genera un cambio de pendiente abrupto e interrumpe el crecimiento suavizado de la curva de los hits.

Las mismas curvas pero con menor suavizado se observaron para el caso de las cuentas acumuladas (Figura 101), y el análisis de las cuentas sin acumular dio como resultado que el comienzo de los daños menores (generalmente el primer hit con un

número de cuentas mayor a 10) se presentó en promedio al generarse una carga igual al 60,8 % ($\pm 33,7$) de la P_{max} .

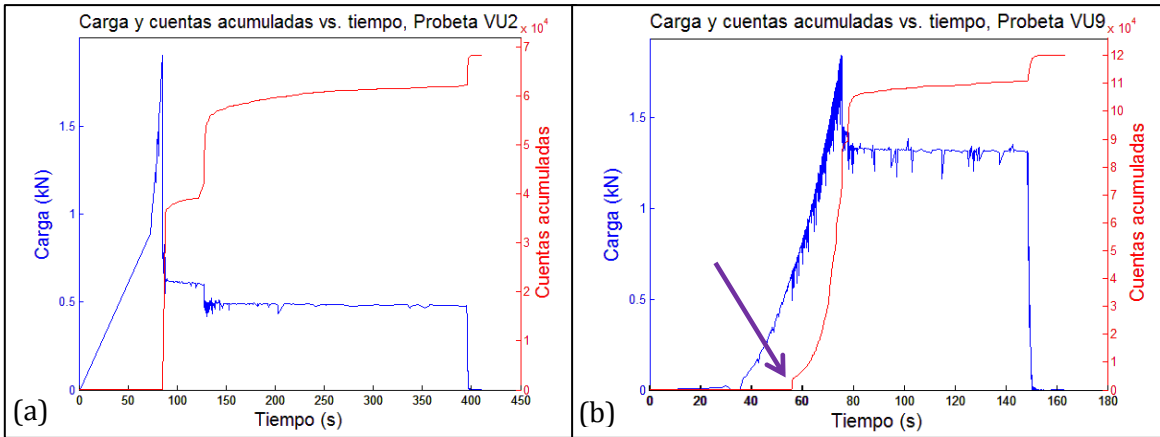


Figura 101: Comportamiento de las cuentas acumuladas en probetas del lote VU. En la probeta VU9 (b) se observa una subida abrupta en el acumulado de cuentas alrededor del segundo 55, lo que indica que se presentó un evento particular de gran valor en sus cuentas en ese momento.

Un hecho interesante es que la energía MARSE no detectó el evento que se produce alrededor del segundo 55 en la probeta número 9, sino sólo las caídas de carga posteriores (Figura 102).

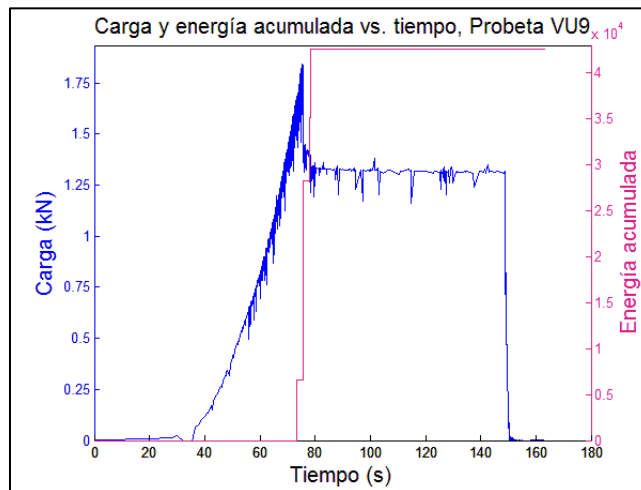


Figura 102: Comportamiento de la energía acumulada (cuentas) en la probeta del lote VU que presentó una subida importante en las cuentas acumuladas y la amplitud alrededor del segundo 55. En este caso, la energía no presenta cambios hasta que se alcanza la carga máxima, en el segundo 73,25.

La amplitud mostró, como en los lotes anteriores, un comportamiento aleatorio en la región previa a la P_{max} , y hits muy juntos y agrupados en el tiempo en los momentos en los que se producen caídas de carga. Durante la carga estática, la EA continuó

emitiendo hits de amplitudes intermedias por un tiempo indefinido, y durante la descarga los hits inician muy juntos y se distancian con el tiempo, hasta dejar de emitirse tras pasar la carga cero. El caso particular de la probeta número 9 reveló que tras el daño producido alrededor del segundo 55, correspondiente a un 34,7 % de la P_{max} , la amplitud se comporta como si hubiera existido una caída de carga y los hits, además de encontrarse agrupados, presentan una tendencia creciente en sus amplitudes (Figura 103b).

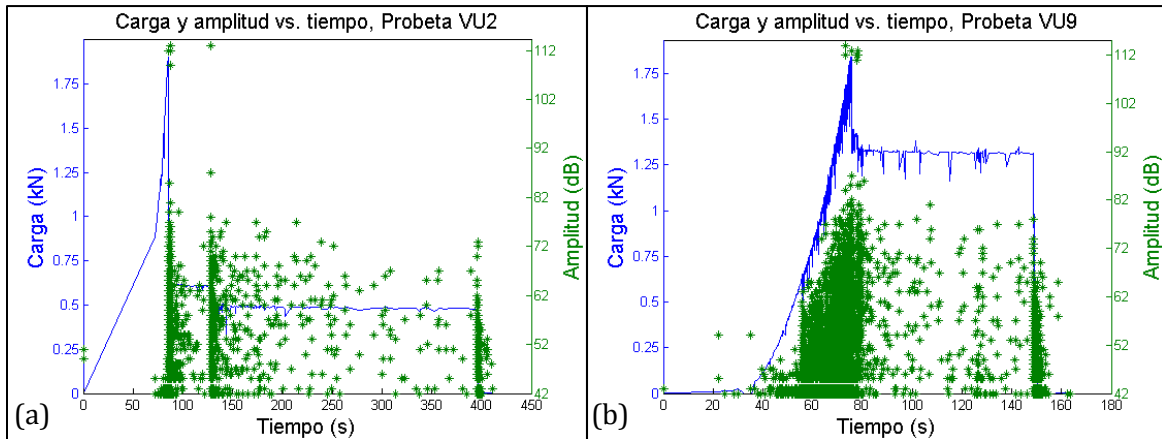


Figura 103: Comportamiento de la amplitud en probetas del lote VU.

En las probetas que fueron ensayadas hasta el 90 % de la P_{max} promedio de las otras, la actividad de EA y las cuentas acumuladas siguen los mismos patrones que las probetas cuya curva de carga fue completa (Figura 104), observándose menos suavizados los trazos cuando el número de eventos es menor.

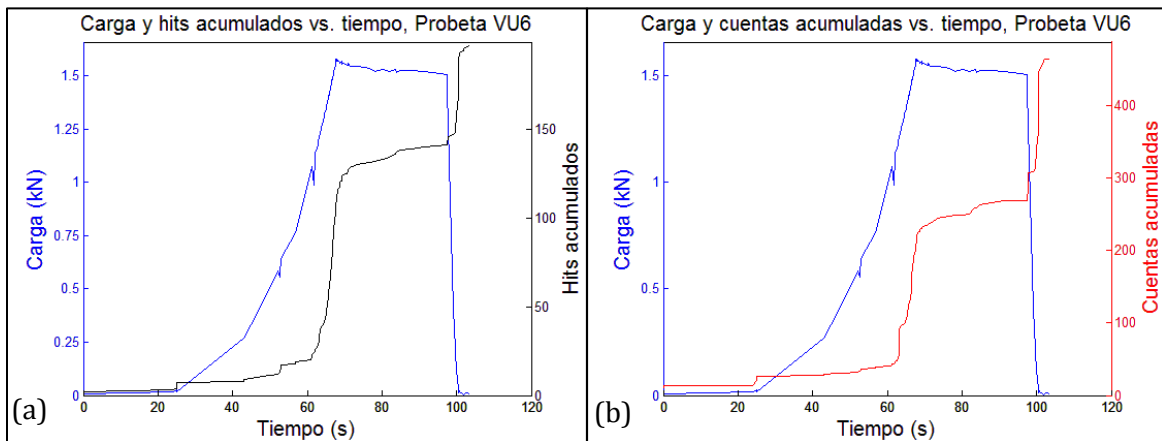


Figura 104: Comportamiento de la actividad de EA (a) y las cuentas acumuladas (b) en una probeta ensayada hasta el 90% de su P_{max} .

La probeta 7 fue la que estuvo más cerca de alcanzar su P_{max} , y reveló un evento con 1028 cuentas segundos antes de detenerse el ensayo. Este evento resultó ser clave en la comprensión del progreso del daño en las probetas de CFRP unidireccionales, y se

confirmó con las micrografías que se trató de micro rotura de fibras en el punto de apoyo de la nariz de carga.

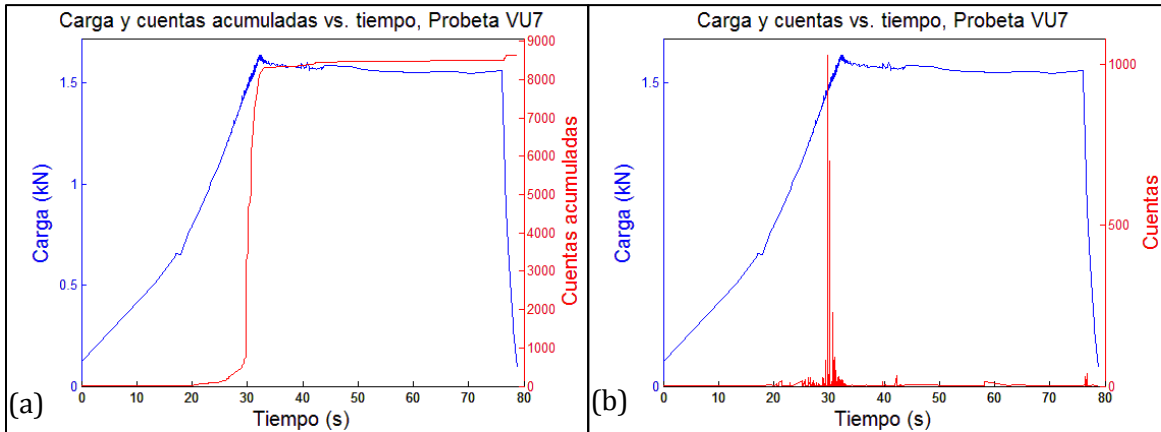


Figura 105: Cuentas acumuladas (a) y sin acumular (b) de la probeta que presentó el evento correspondiente a la primera micro rotura de fibras en el punto de contacto de la nariz de carga.

La energía MARSE detectó este evento, a diferencia de las otras probetas en las que no ocurrió ningún evento de energía mayor a $0,5 \mu\text{V}\cdot\text{s}$ (Figura 106a y Figura 106b), y la amplitud se concentró y elevó en ese punto (Figura 107b).

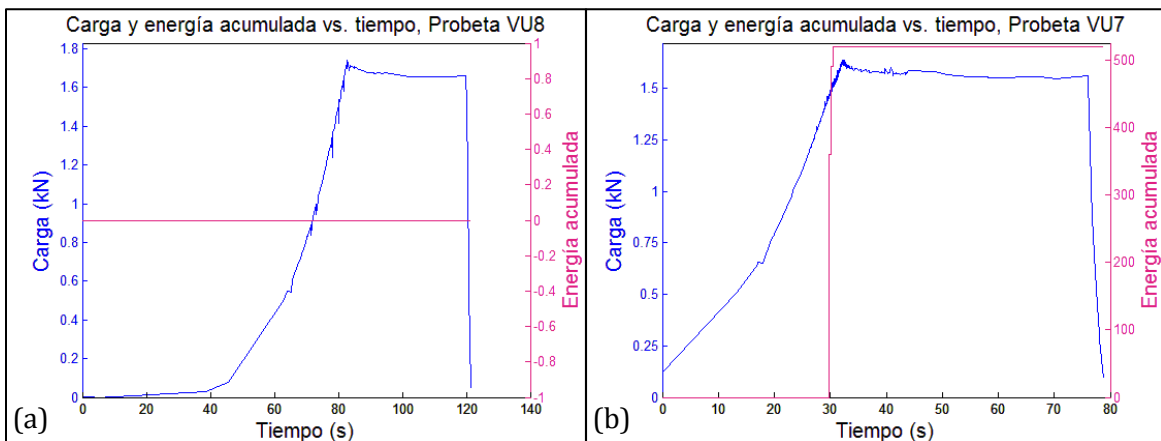


Figura 106: Comparación de la energía acumulada (cuentas) en una probeta que no tuvo daños observables en el microscopio (a) con la probeta que reveló la micro rotura de fibras que advierte del comienzo de los daños mayores (b).

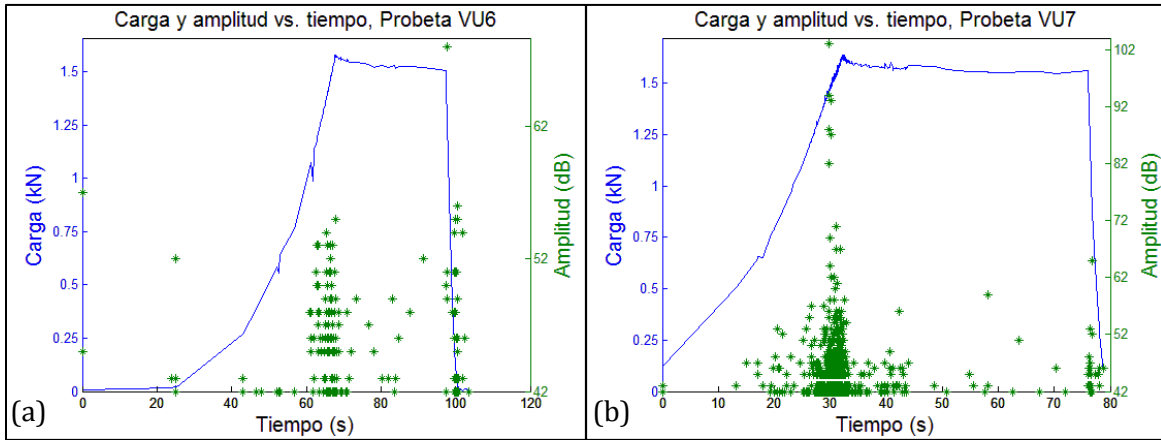


Figura 107: Comparación de la amplitud en una probeta que no tuvo daños observables en el microscopio (a) con la probeta que reveló la micro rotura de fibras que advierte del comienzo de los daños mayores (b).

5.3.4 Lote VB

Las probetas de este lote también se dividen en dos: probetas que se ensayaron hasta la rotura y probetas que se ensayaron hasta el 90 % de la carga máxima promedio de las anteriores.

Lo más interesante de estas probetas fue que en tres de las seis probetas que se ensayaron hasta la P_{max} , existieron roturas posteriores durante la carga estática, con un máximo de tres roturas registradas en la probeta número 4 en estas condiciones.

Las figuras de la actividad de EA, las cuentas acumuladas y la energía MARSE de las probetas 2 y 4 se muestran a continuación.

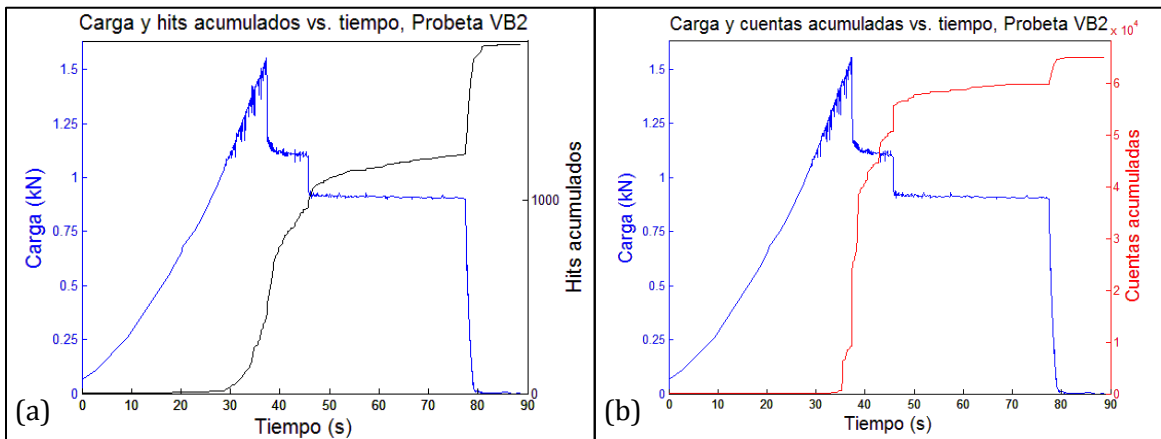


Figura 108: Actividad de EA (a) y cuentas acumuladas (b) de la probeta VB2. Se observa una rotura posterior durante la carga estática alrededor del segundo 45.

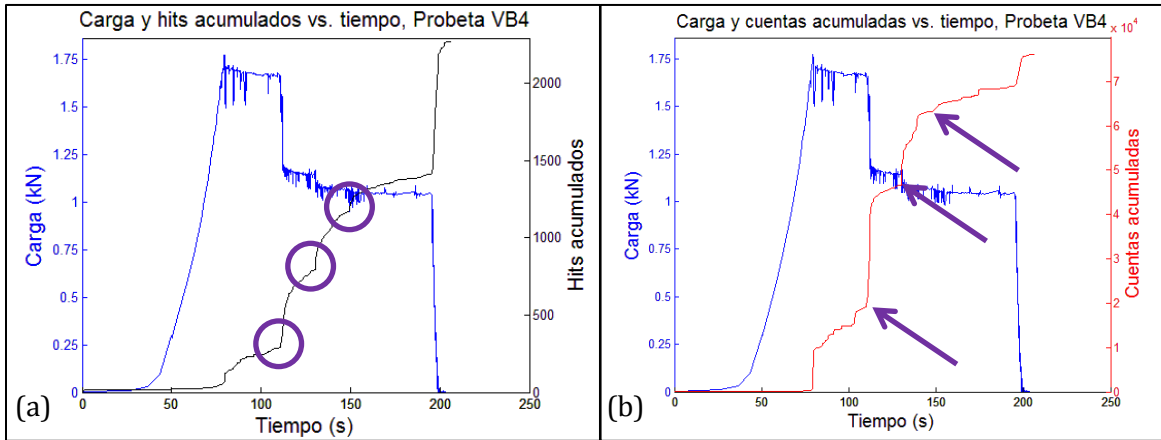


Figura 109: Actividad de EA (a) y cuentas acumuladas (b) de la probeta VB4. Esta probeta presentó tres roturas audibles luego de detenerse la carga, evidenciadas por los cambios de pendiente abruptos en estos parámetros en los segundos 110, 130 y 149.

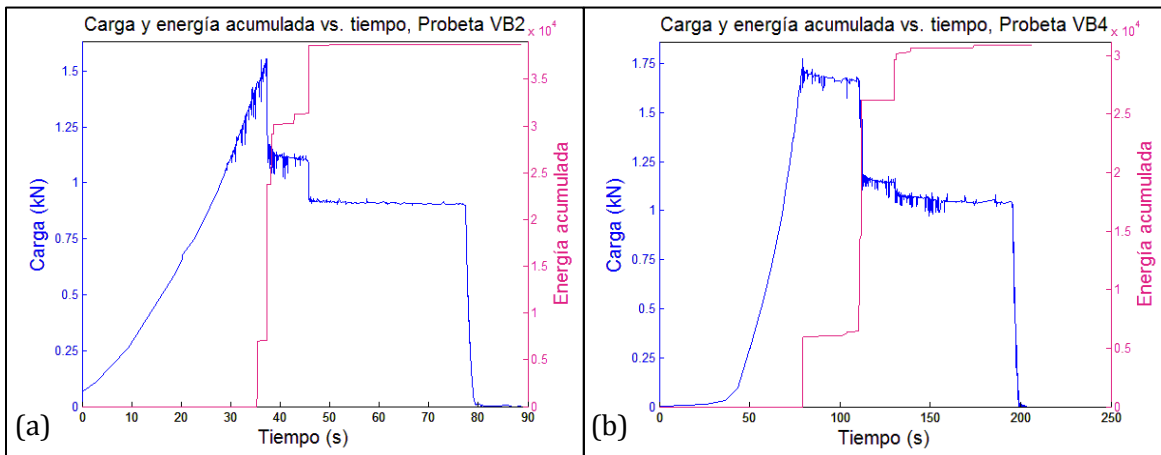


Figura 110: Energía acumulada (cuentas) de los hits en las probetas VB2 (a) y VB4 (b).

El comienzo de los daños menores, dado típicamente por el primer hit con un número de cuentas mayor a 10, se encontró en promedio al alcanzar el 70,6 % ($\pm 17,8$) de la P_{max} (resumen en la sección 5.4).

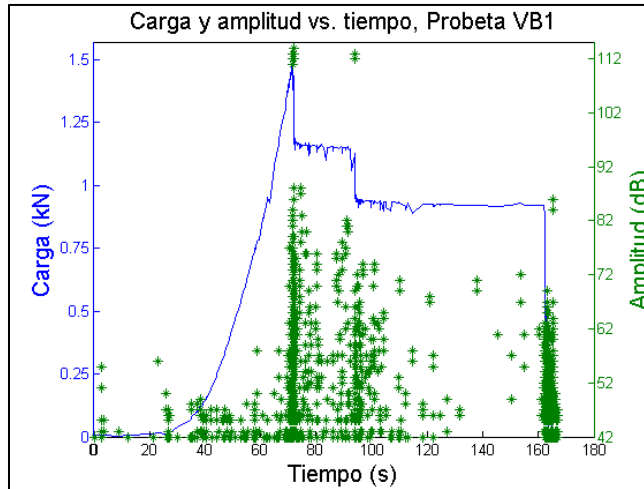


Figura 111: Ejemplo del comportamiento de la amplitud en probeta del lote VB. Se observa la rotura que sufrió durante la carga estática alrededor del segundo 110.

En las probetas ensayadas hasta antes de su P_{max} , se observaron los mismos comportamientos que en las probetas del lote anterior, sin ningún evento detectado por la energía. A modo de ejemplo se presentan la actividad y las cuentas acumuladas de la probeta 6 en la Figura 112, y la amplitud en la misma probeta en la Figura 113.

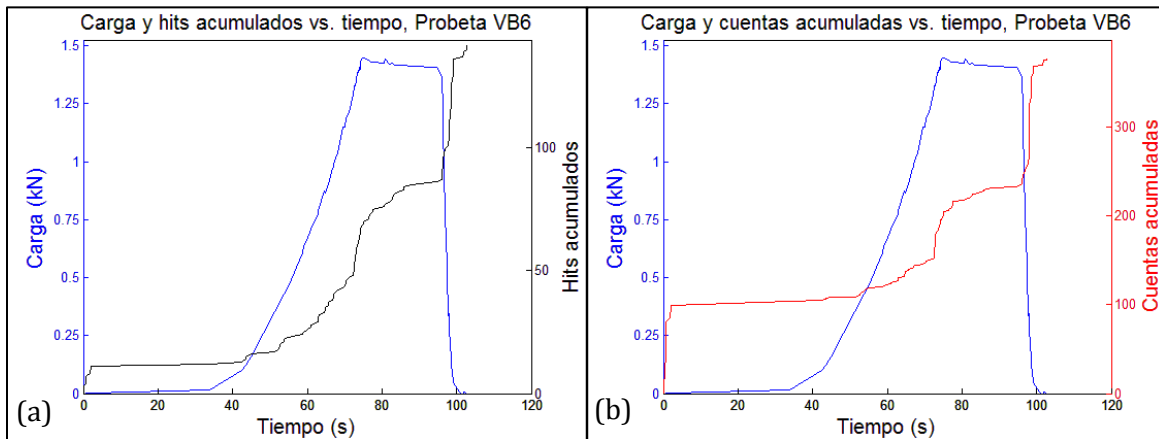


Figura 112: Actividad de EA (a) y cuentas acumuladas (b) en probeta del lote VB en la que la carga se detuvo al alcanzar el 90% de la P_{max} promedio de este lote.

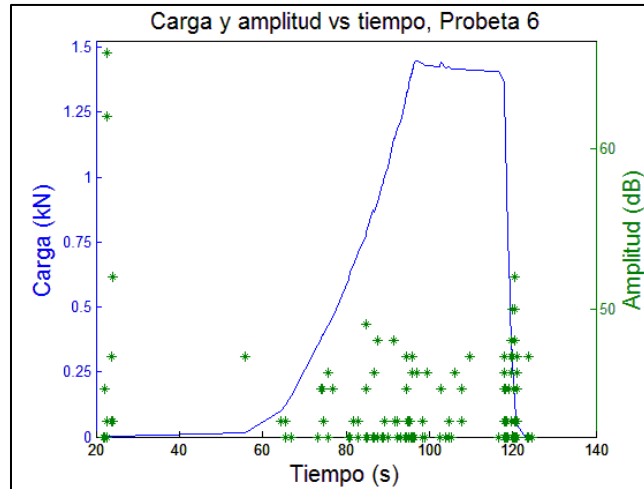


Figura 113: Amplitud de los hits en probeta del lote VB en la que la carga se detuvo al alcanzar el 90% de la P_{max} promedio de este lote.

5.3.5 Lote NB

La actividad de EA sigue los mismos patrones que se estudiaron hasta el momento, pero con la excepción de dos casos extremos durante la carga estática: en la probeta número 4, la actividad de EA se calma a los 20 s y la curva se mantiene horizontal; en la probeta número 5, por el contrario, la actividad de EA no se calmó durante más de 160 s y se detuvo la adquisición de datos antes de continuar registrando señales durante la carga estática (Figura 114a y Figura 114b). Basándose en la actividad de EA, este crecimiento ilimitado no estaría necesariamente relacionado a la probeta y podría haberse debido a un ruido indeseado en la instalación, ya que este parámetro no pondera las características del hit. Sin embargo, la evolución de las cuentas sin acumular y la amplitud de los hits registraron eventos significativos en todo ese tiempo (Figura 115a y Figura 116b), dos de ellos captados por la energía (Figura 115b), por lo que no se descarta la posibilidad de que fueran eventos producidos por el propio material. La probeta 3 fue la única que sufrió una segunda caída de carga con EA durante la etapa de carga estática.

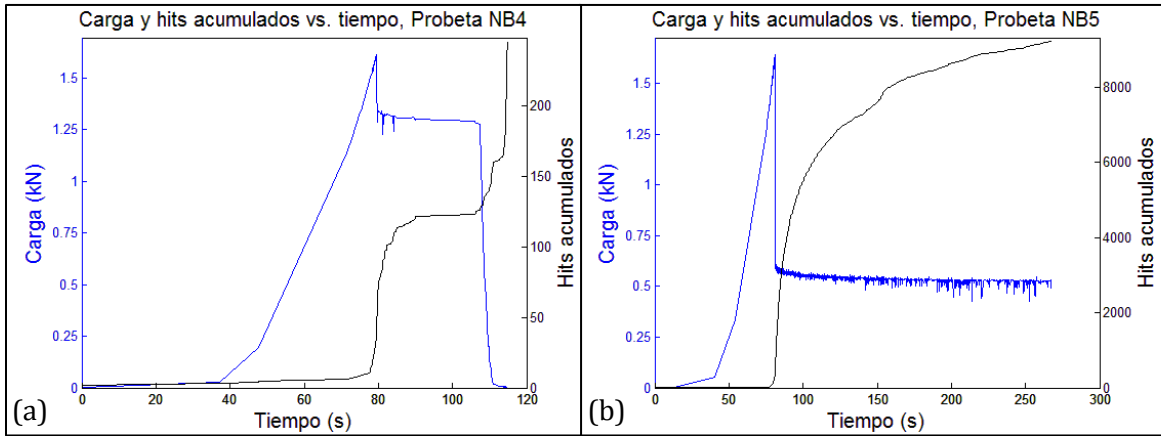


Figura 114: Comportamiento de la actividad de EA en probetas del lote NB. Casos extremos en los que la actividad de EA se detiene a los pocos segundos de detenerse la carga (a) o continúa por más de 160 segundos luego de detenerse la carga (b).

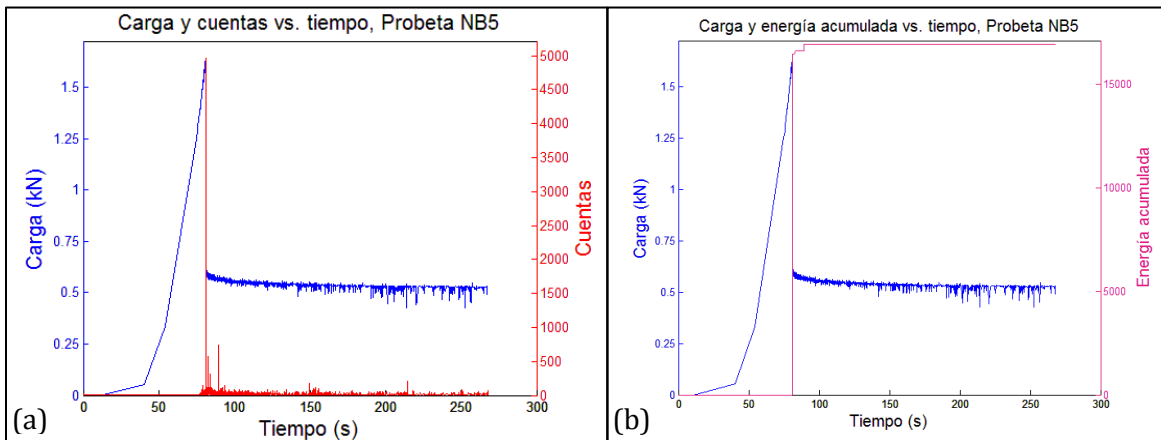


Figura 115: Cuentas sin acumular y energía acumulada (cuentas) durante la carga estática de la probeta del lote NB que no cesó su actividad de EA por más de 160 segundos luego de detenerse la carga.

El comienzo de los daños menores, dado típicamente por el primer hit con un número de cuentas mayor a 10, se encontró en promedio al alcanzar el 83,4 % (± 18) de la P_{max} (resumen en la sección 5.4).

En general no hubo muchos hits en la zona previa a P_{max} , concentrándose cerca de la misma (Figura 116a y Figura 116b).

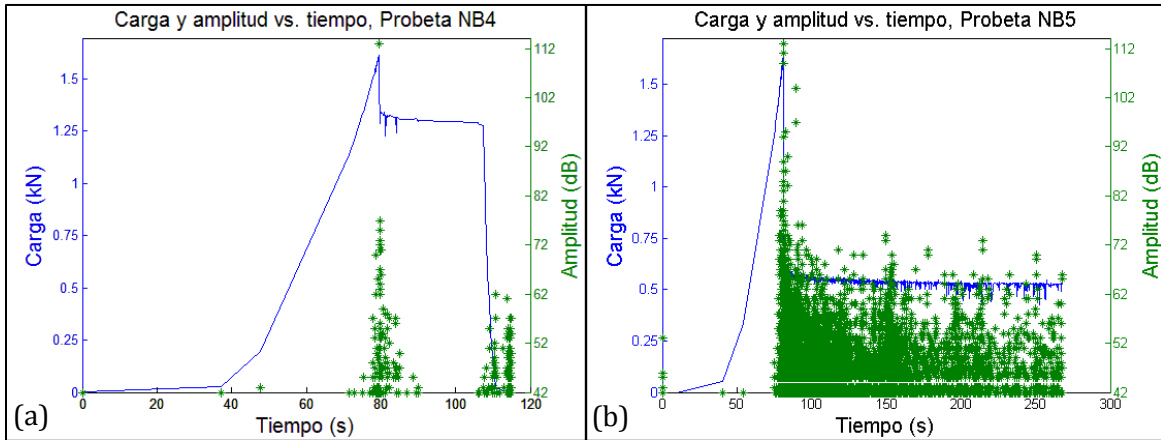


Figura 116: Amplitud de los hits en las probetas del lote NB que presentaron casos extremos durante la carga estática. En la parte (a) se observa que los hits dejan de registrar amplitudes mayores al umbral de 42 dB durante la carga estática, mientras que en la parte (b) se observa que no dejan de registrarse hits con amplitudes mayores a 65 dB durante más de 160 segundos.

Las probetas ensayadas hasta el 90% de la P_{max} promedio no presentaron comportamientos fuera de lo común en estos lotes.

5.3.6 Lote KB

El comportamiento de estas probetas es el que ya se ha visto para caídas de carga graduales, con curvas acumuladas crecientes a una pendiente determinada por la severidad de los daños. Los cambios de pendiente más importantes se producen cercanos a la P_{max} y al detenerse la flexión de las probetas. Como en todas las otras probetas de los lotes anteriores, las curvas de las cuentas acumuladas son menos suaves que las de la actividad de EA, y la energía acumulada detecta la caída de carga que se produce en P_{max} , junto con otras caídas posteriores.

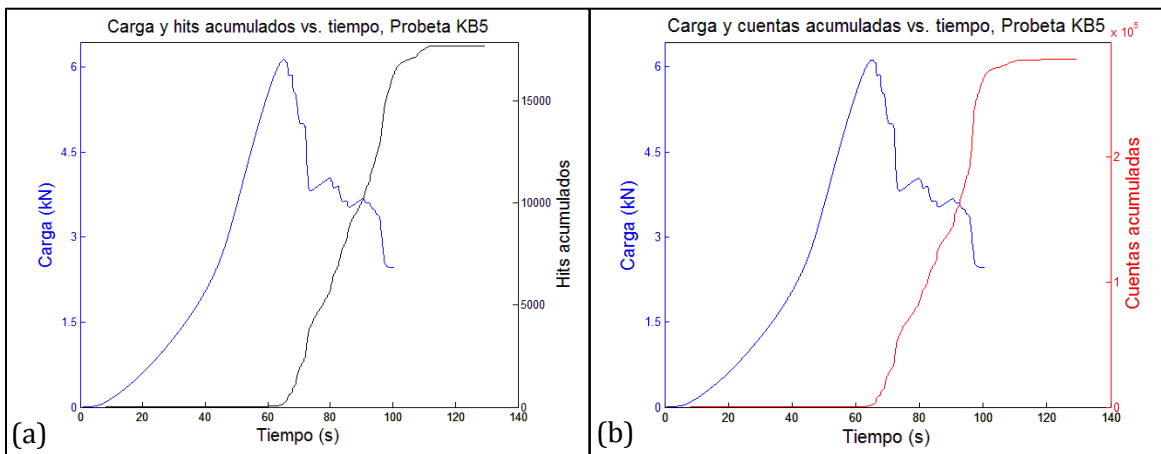


Figura 117: Comportamiento de la actividad de EA (a) y las cuentas acumuladas (b) en probeta del lote KB.

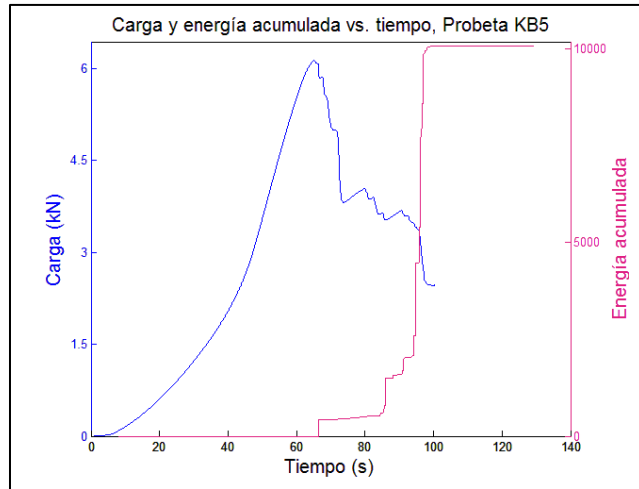


Figura 118: Comportamiento de la energía acumulada (cuentas) en probeta del lote KB.

El análisis de las cuentas sin acumular dio como resultado que el inicio relevante del cambio de pendiente en los valores acumulados (típicamente el primer evento cuyo valor de cuentas fuera mayor a 20) se produjo en promedio al alcanzar el 46,1% ($\pm 19,9$) de la P_{max} (resumen en la sección 5.4).

Debido a que la amplitud de los hits presentó comportamientos muy azarosos en la zona previa a la P_{max} (Figura 119a y Figura 119b), se analizó sólo el promedio de la aparición de los primeros hits con amplitudes mayores a 65 y 70 dB en lugar de incluir las amplitudes inferiores, porque los hits que aparecieron en cargas muy bajas tuvieron amplitudes de hasta 60 dB que favorecían a la dispersión.

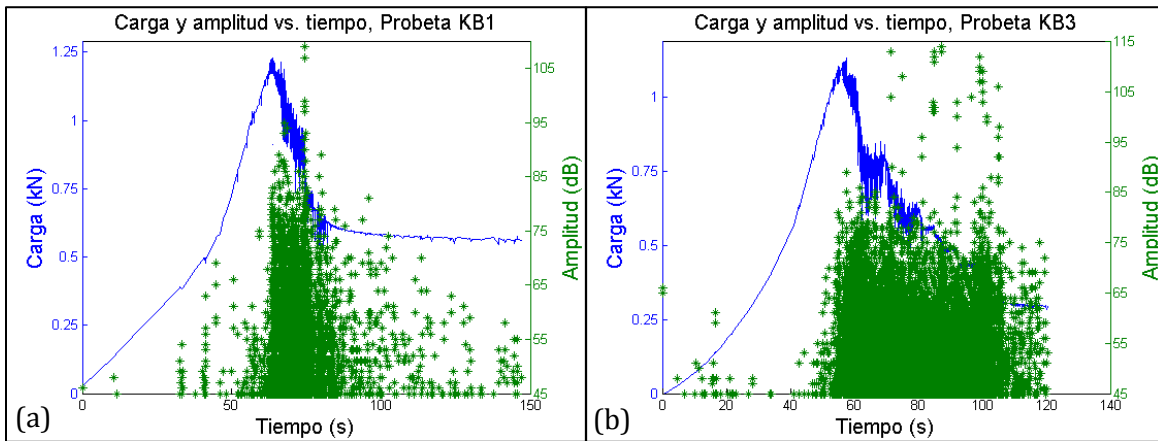


Figura 119: Comportamiento de amplitud en probetas del lote KB. La distribución de amplitudes en la zona previa a la P_{max} es muy azarosa.

El resultado de este análisis demostró que el primer hit cuya amplitud es mayor o igual a 65 dB se encuentra en promedio al alcanzar el 80 % ($\pm 19,5$) de la P_{max} , y el primer hit con amplitud mayor o igual a 70 dB en el 90,6 % ($\pm 11,5$).

5.3.7 Lote KC

Las probetas de este lote presentaron en general cuatro o cinco cambios de pendiente en la curva de la actividad de EA durante el progreso de la flexión: primero se presenta un aumento significativo de la actividad cuando la carga muestra su primer ascenso abrupto; luego se produce un escalón en la curva al caer la carga e iniciarse la etapa en la que esta permanece constante; más adelante y durante esta etapa se puede presentar una pequeña perturbación en la carga que genere un tercer cambio de pendiente o escalón visible; el siguiente cambio de pendiente se produce cuando la carga vuelve a elevarse y la probeta empieza a flexionarse en contra de su curvatura original; finalmente, la última etapa se produce cuando la probeta se descarga tras pasar su resistencia máxima y la actividad de EA se apacigua, volviendo a aplanarse la curva (Figura 120).

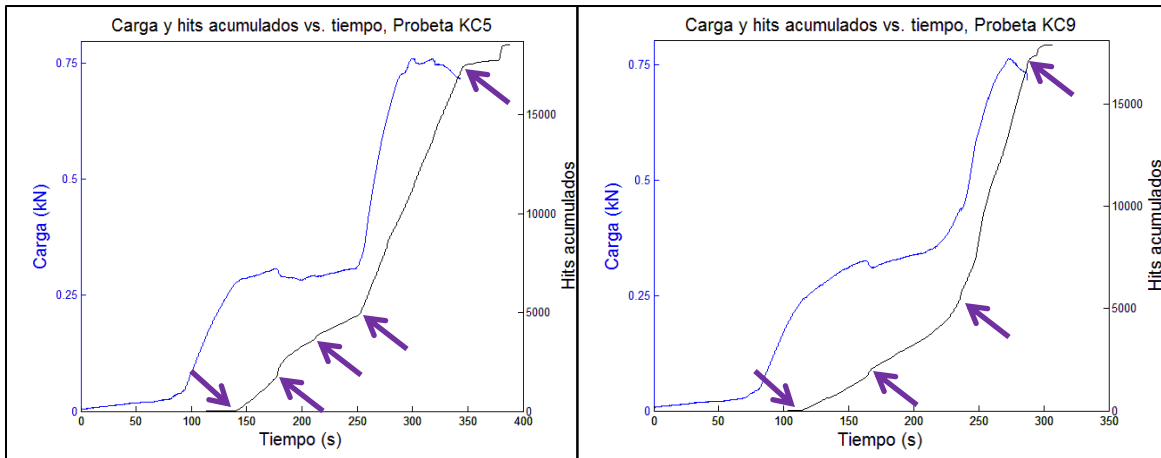


Figura 120: Cambios de pendiente característicos en la carga y la actividad de EA de las probetas del lote KC (especímenes curvos). El último escalón se produce cuando, terminada la descarga, se alcanza la carga cero y la nariz deja de tocar a la probeta; no es un comportamiento debido a eventos dentro de la probeta.

Las curvas de cuentas acumuladas no presentaron tantas diferencias con las de la actividad como en los otros lotes estudiados (Figura 121).

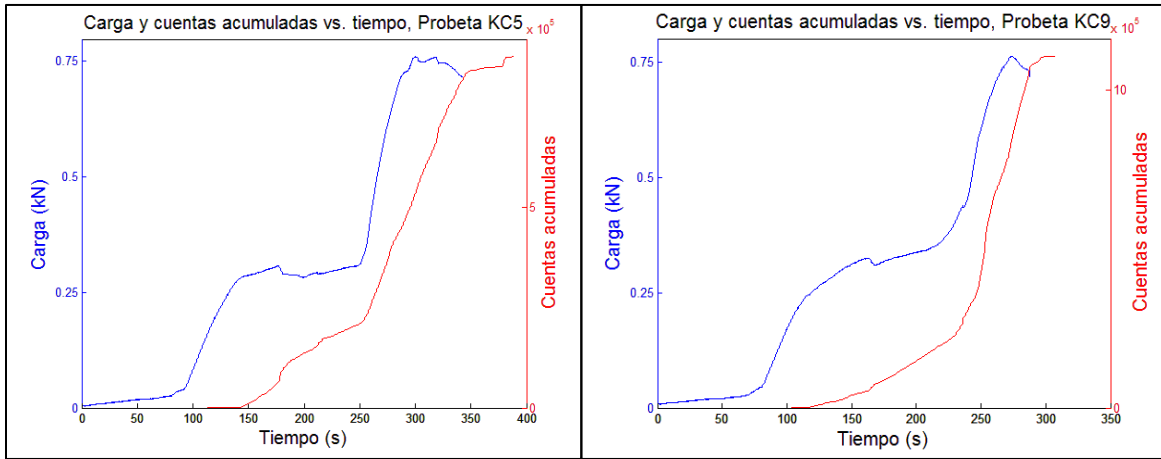


Figura 121: Cuentas acumuladas durante los ensayos en probetas del lote KC.

En los gráficos de las cuentas sin acumular se observan los picos que generan estos cambios de pendiente y varios otros entre medio (Figura 122).

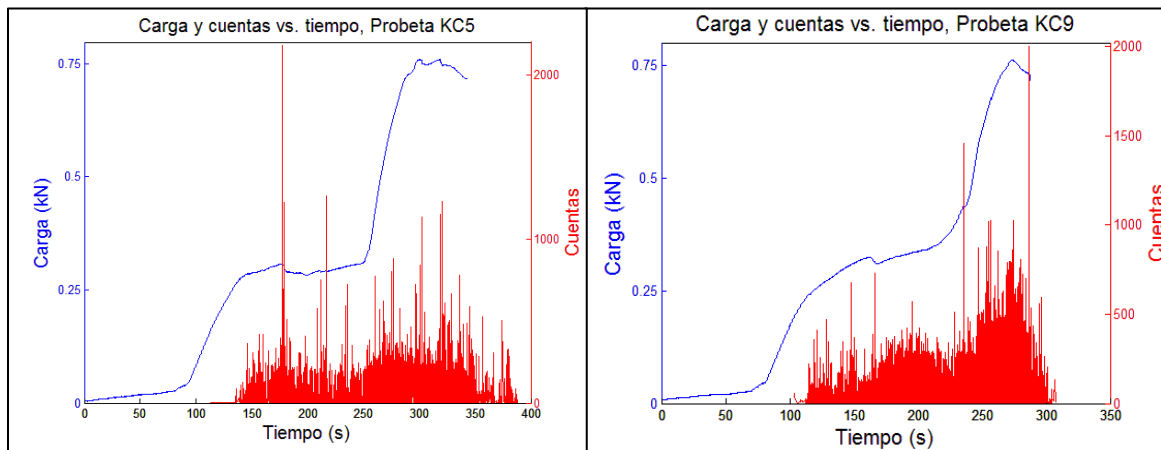


Figura 122: Evolución de las cuentas sin acumular durante los ensayos en probetas del lote KC.

Por su parte la energía en estas probetas no determina el daño mayor que se consideraba irreversible en las probetas planas, debido a que por la naturaleza de su fabricación los valores distintos de cero comienzan, en general, durante la primera subida de carga.

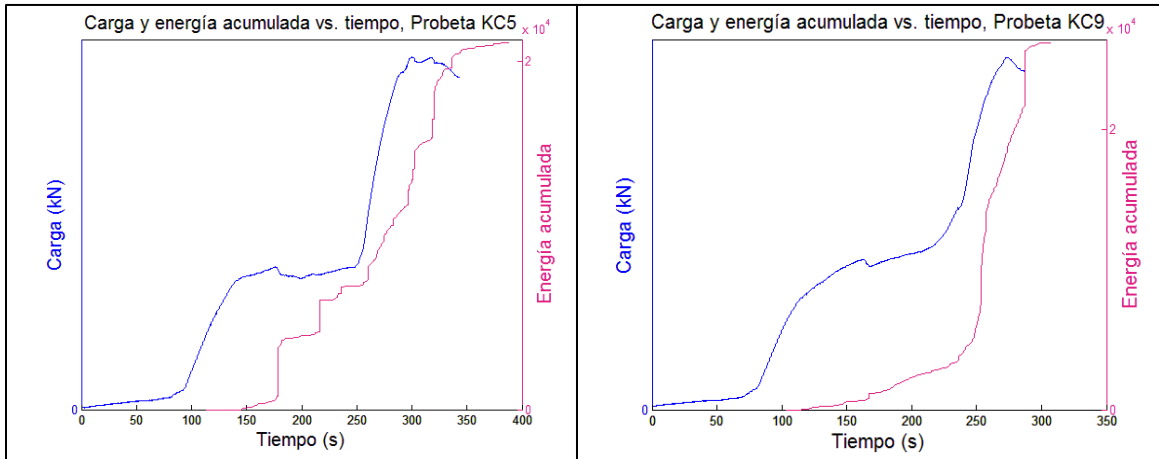


Figura 123: Energía acumulada (cuentas) en las probetas del lote KC.

Los valores de la amplitud siguieron fluctuaciones similares al número de cuentas y fueron superiores a 70 dB en los momentos en los que se produjeron los daños mayores, como los que se producen al solicitar a las probetas en contra de su curvatura original durante la última subida de carga (Figura 124).

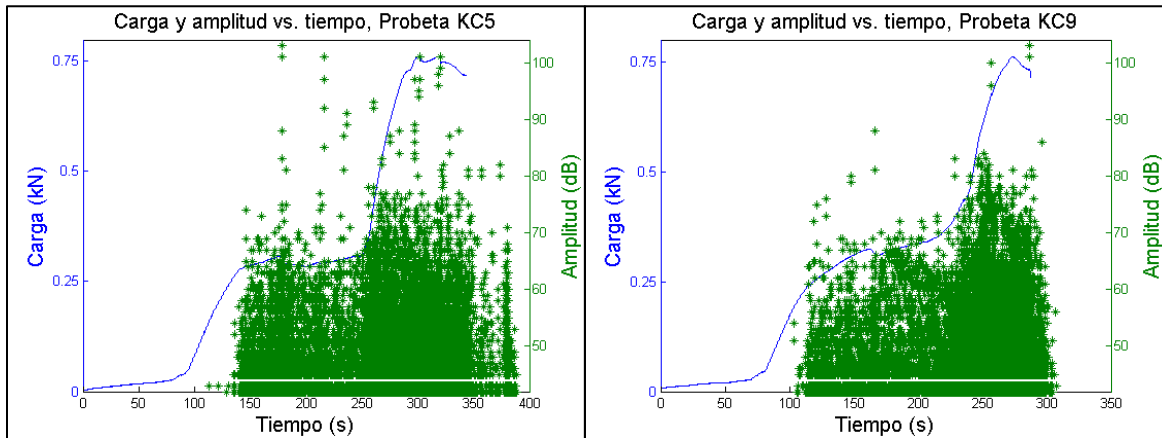


Figura 124: Amplitud de los hits en las probetas del lote KC.

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CUENTAS Y LA AMPLITUD EN LOS LOTES CONSIDERADOS

Comparando los resultados estadísticos del análisis de las cuentas y la amplitud en los lotes con especímenes planos, se pudieron obtener las siguientes tablas:

Tabla VII: Comparación del comienzo de los daños menores según el criterio de las cuentas en los lotes considerados.

Lote de probetas	NUar	NUbr	VU	VB	NB	KB
Comienzo de los daños menores basado en las cuentas (% de la P_{max})	47,5	37,0	60,8	70,6	83,4	46,1
Desviación estándar	15,0	13,5	33,7	17,8	18,0	19,9

Tabla VIII: Comparación del comienzo de los daños menores según el criterio de la amplitud en los lotes considerados.

Lote de probetas	NUar	NUbr	VU	VB	NB
Primer hit ≥ 50 dB (% de la P_{max})	48,2	34,5	47,1	72,6	83,4
Desviación estándar	22,7	12,8	33,8	21,1	16,8
Primer hit ≥ 55 dB (% de la P_{max})	64,2	51,8	64,5	87,2	84,1
Desviación estándar	18,1	15,6	32,2	17,4	17,1
Primer hit ≥ 60 dB (% de la P_{max})	89,7	75,3	87,4	95,9	86,3
Desviación estándar	10,0	15,3	25,9	4,0	18,3
Primer hit ≥ 65 dB (% de la P_{max})	97,4	93,3	89,3	95,9	95,7
Desviación estándar	2,8	7,7	24,2	4,0	3,3

De la Tabla VII, se observa que en las probetas del lote NUbr el comienzo de los daños menores ocurre antes que en el lote NUar. Esto es acorde a la bibliografía estudiada [76, 77], en donde se menciona que a medida que la adhesión entre la matriz y el refuerzo se mejora, o en los materiales compuestos que presentan mejor consolidación, los eventos de EA aparecen tardíamente, produciéndose cerca de la fractura final. También hay un retraso en la aparición de los primeros daños menores en las probetas bidireccionales respecto a las unidireccionales, lo que podría indicar que si bien la resistencia a la flexión disminuye (simplemente por cuestiones de orientación de las capas), la adhesión o consolidación entre la matriz y las fibras se mejora, y por lo tanto los daños y los eventos de EA se detectan más tarde y cerca de la resistencia máxima. El caso de las probetas del lote KB es un caso aparte, porque está conformado diferente, y para el análisis se tomó como referencia el primer hit con un número de cuentas mayor o igual a 20 en lugar de 10.

Por otra parte, en la Tabla VIII, se observa que existe un marcado retraso en la aparición de los primeros hits con amplitud mayor a 50 y 55 dB en las probetas bidireccionales respecto de las probetas unidireccionales. Esto refuerza la teoría de que existe mayor consolidación entre capas en las probetas bidireccionales, y es un factor a tener en cuenta cuando se realizan ensayos de EA en este tipo de materiales compuestos. Además, también se observa que las probetas vencidas unidireccionales son las que presentan mayor dispersión en la aparición de los distintos hits a lo largo de la carga, sobre todo en valores altos de amplitud y comparadas con las del lote NUar, lo que puede estar relacionado a la utilización de resina vencida. El caso del lote VB mostró una menor dispersión a partir de 60 dB, debido a que estos hits ocurrían muy cercanos o posteriores a la P_{max} , y debido a que su valor es elevado, los primeros

hits con amplitud mayor a 60 dB son los mismos que los primeros con amplitud mayor a 65 dB.

Comparando las dos tablas, se comprueba que el criterio del comienzo de los daños menores según las cuentas es similar al criterio del primer hit con amplitud mayor o igual a 50 dB, con una identidad de valores en el caso del lote NB. La mayor diferencia se encuentra en el lote VU, que ya de por sí tiene más dispersión, y la razón es que en estas probetas aparecieron más hits con amplitudes mayores o iguales a 50 dB pero con cuentas menores a 10. Como en el comienzo de los ensayos es más probable encontrar hits con amplitudes elevadas en lugar de cuentas elevadas, y estos podrían deberse a rozamientos y acomodamientos indeseados, se considera más acertado el criterio de las cuentas.

5.5 ANÁLISIS FFT Y WAVELETS

En las probetas en las que se ensayó la resistencia a la flexión de la resina, se obtuvieron señales iniciales con contenidos de frecuencia en los rangos de 93-137 kHz, 214-257 kHz y 441-464 kHz (Figura 125). Debido a la naturaleza del ensayo, estos rangos probablemente están relacionados al agrietamiento de la matriz de cianato éster. Por otra parte, para los eventos correspondientes al quiebre, en todas las probetas se obtuvieron señales muy peculiares que se comportaron como un hit de rotura ordinario al comienzo y luego presentaron una resonancia muy marcada al final, que en la mayoría de los casos no se extinguió en los 2 ms que dura la adquisición de los eventos (Figura 127). La frecuencia de estos hits se repitió para todos los especímenes tratados y presentó cuatro picos muy distinguidos centrados alrededor de 95, 158, 222 y 283 kHz (Figura 127). En el análisis por medio de Wavelets se distinguen con claridad la primera parte de los hits, que no es resonante, y la segunda parte, que presenta esta resonancia, y en la que sólo los componentes frecuenciales centrados en 95 y 158 kHz se mantienen a lo largo del tiempo (Figura 128).

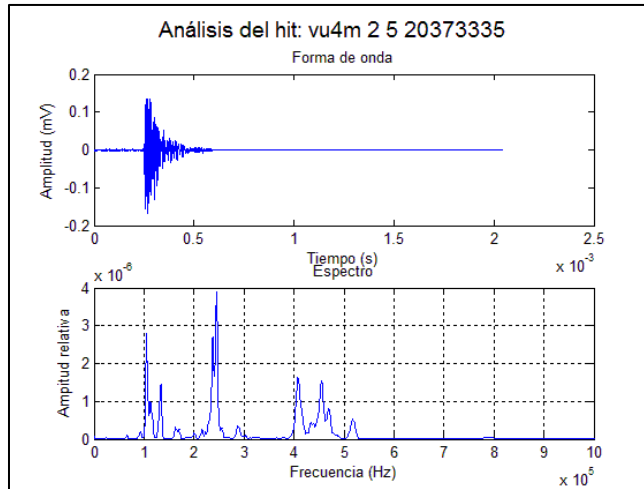


Figura 125: Forma de onda y análisis espectral de los primeros daños en la resina de cianato éster vencida.

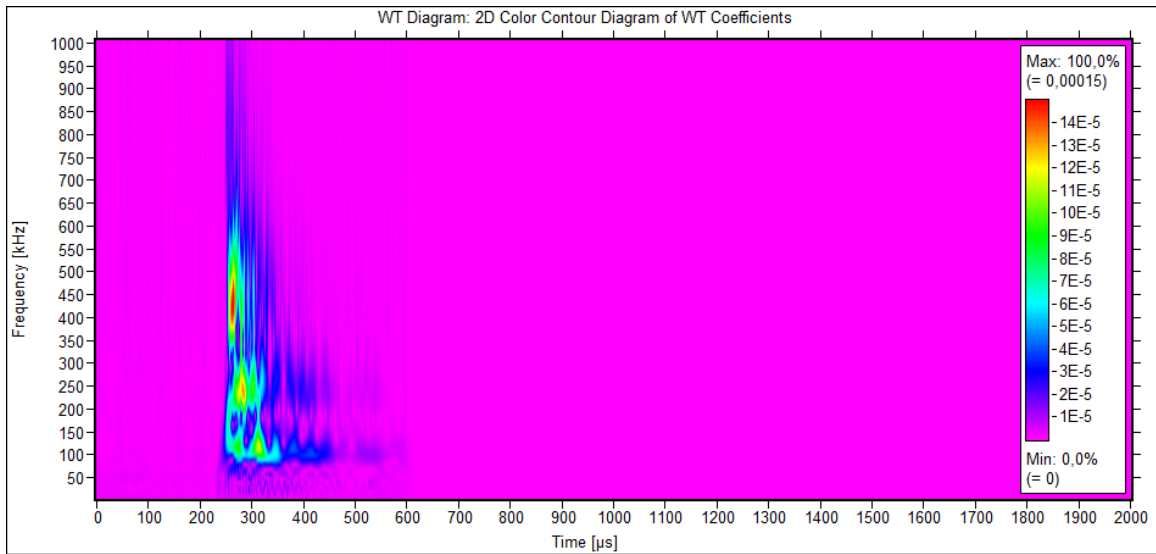


Figura 126: Análisis wavelets de la forma de onda correspondiente a los primeros daños en la resina de cianato éster vencida.

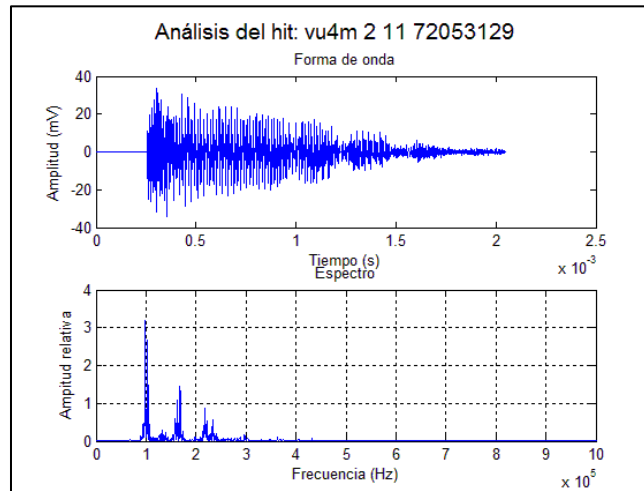


Figura 127: Forma de onda y análisis espectral correspondiente al quiebre de la resina de cianato éster vencida.

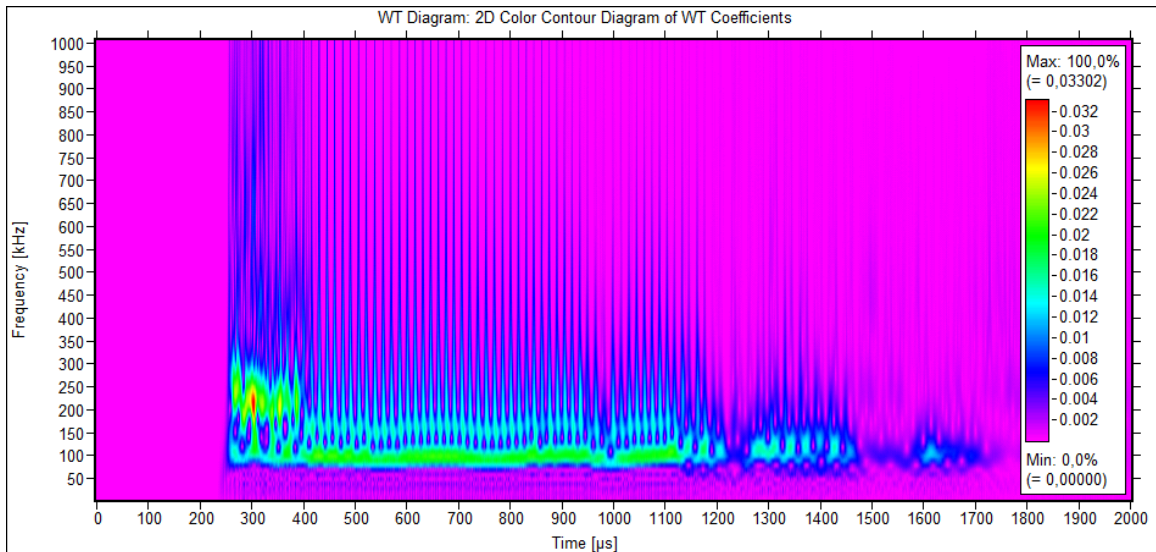


Figura 128: Análisis wavelets de la forma de onda correspondiente al quiebre de la resina de cianato éster vencida.

En las demás probetas, se estudió la frecuencia de los hits correspondientes al inicio de los daños menores y al momento en el que la energía registró el primer hit con un valor distinto de cero, correspondiente en general con la ocurrencia de la P_{max} (llamando mecanismos de daño tempranos a los primeros y mecanismos de daño tardío a los segundos).

En la Tabla IX se resumen los rangos de frecuencia característicos de cada mecanismo de daño para varios lotes.

Tabla IX: Rangos de frecuencia característicos de los mecanismos de daño tempranos y tardíos en las probetas analizadas.

Lote	Rangos de frecuencia característicos (kHz)							
	Mecanismos de daño tempranos			Mecanismos de daño tardíos				
NUbr	96-107	233-266	430-514	90	103	206	243	-
VU	92-104	250-283	380-495	94	103	-	240	400-433
VB	100	242 ; 282	410-510	92	102	133	242	-
NB	-	242 ; 280	434-515	93	102	129	220-243	404-429

Se puede observar que existen similitudes entre las frecuencias obtenidas por las señales del lote NUbr y el lote VU, así como también entre las frecuencias del lote VB y NB. Esto indica que las probetas con una secuencia de apilamiento unidireccional se comportaron de la misma manera a pesar de ser de diferentes lotes, y que lo mismo se puede decir para las probetas bidireccionales. La principal diferencia entre los mecanismos de daño tempranos y tardíos en las probetas unidireccionales es que los primeros suelen presentar componentes frecuenciales más altos que por lo general no se aprecian relevantes en los mecanismos tardíos (Figura 129), aunque en el lote VU algunos hits del mecanismo tardío mostraron componentes leves en alta frecuencia (Figura 131b) (podría pensarse que esto fue debido a la superposición de hits observada en las formas de onda, pero el análisis wavelets reveló que los componentes de alta frecuencia se encuentran desde el comienzo de cada uno de estos eventos). En los lotes VB y NB, el mecanismo de daño temprano no presentó (en la mayoría de los casos) componentes frecuenciales entre 92 y 102 kHz, como sí ocurrió en el mecanismo tardío, y este último presentó más seguido componentes en alta frecuencia respecto de las probetas unidireccionales (Figura 133 y Figura 135). Esto podría ser atribuido a varios fenómenos, como al efecto Felicity, la rotura de nuevas capas de 90° al producirse los daños posteriores de las capas orientadas a 0°, o al hecho de que las capas de 90° interiores podrían tener componentes frecuenciales distintos a los de las capas de 90° superficiales, como indica la literatura para pruebas de tracción [19,74].

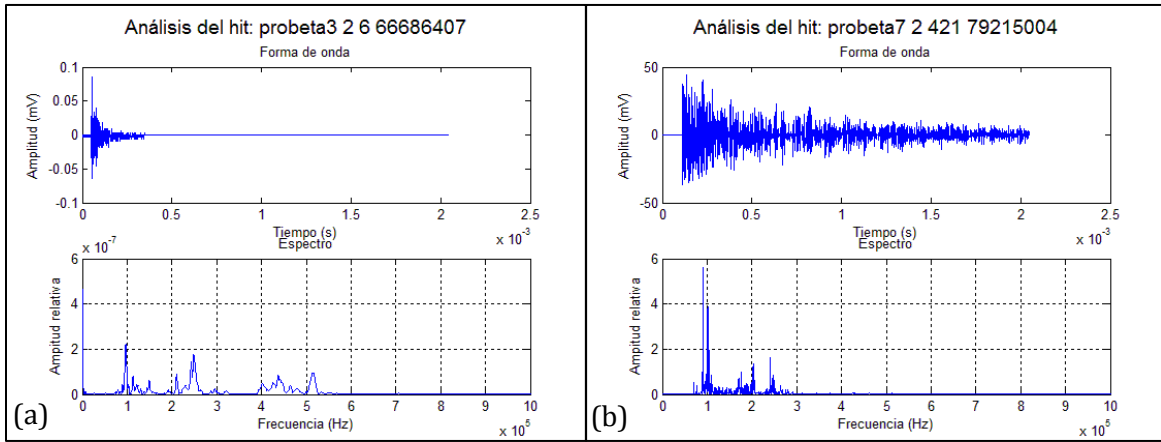


Figura 129: Formas de onda y espectros correspondientes a los daños tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote NUbr.

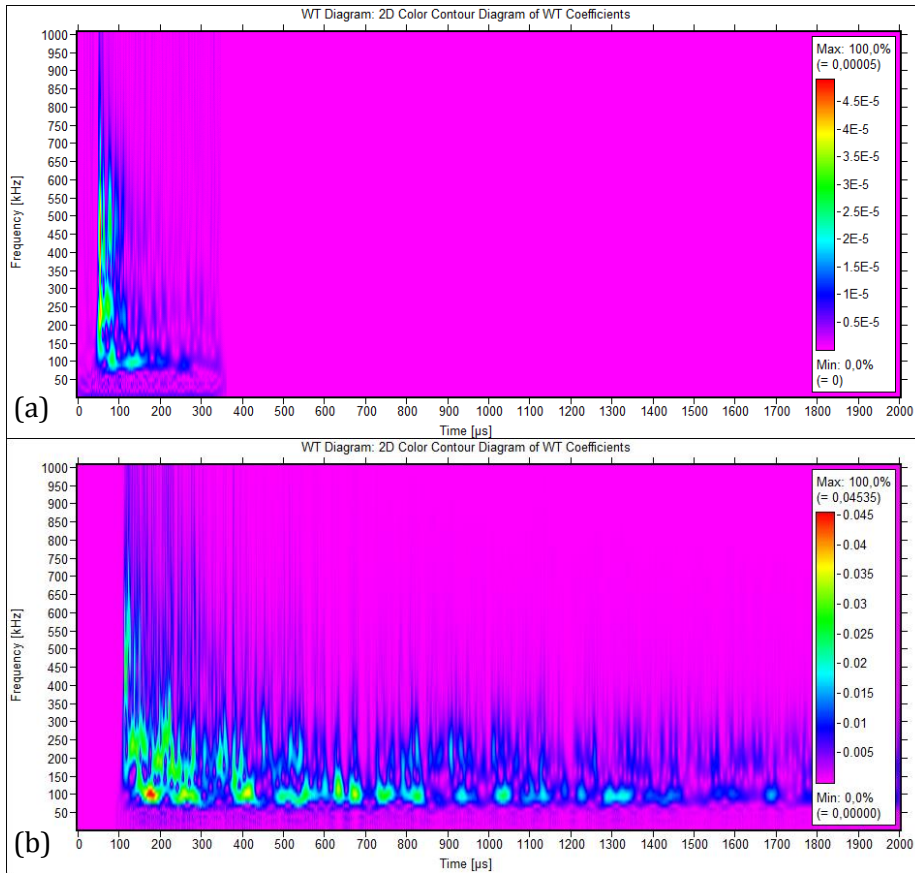


Figura 130: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a los mecanismos de daño tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote NUbr.

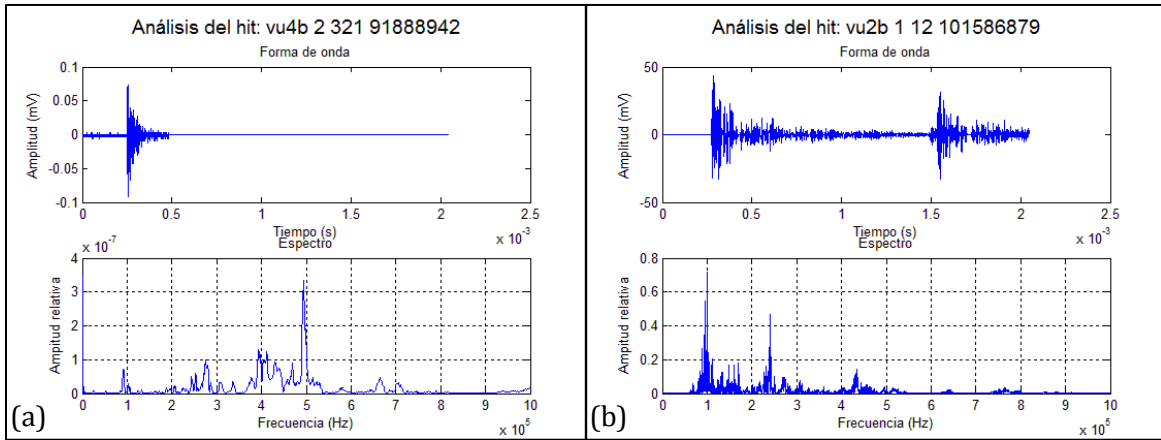


Figura 131: Formas de onda y espectros correspondientes a los daños tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote VU.

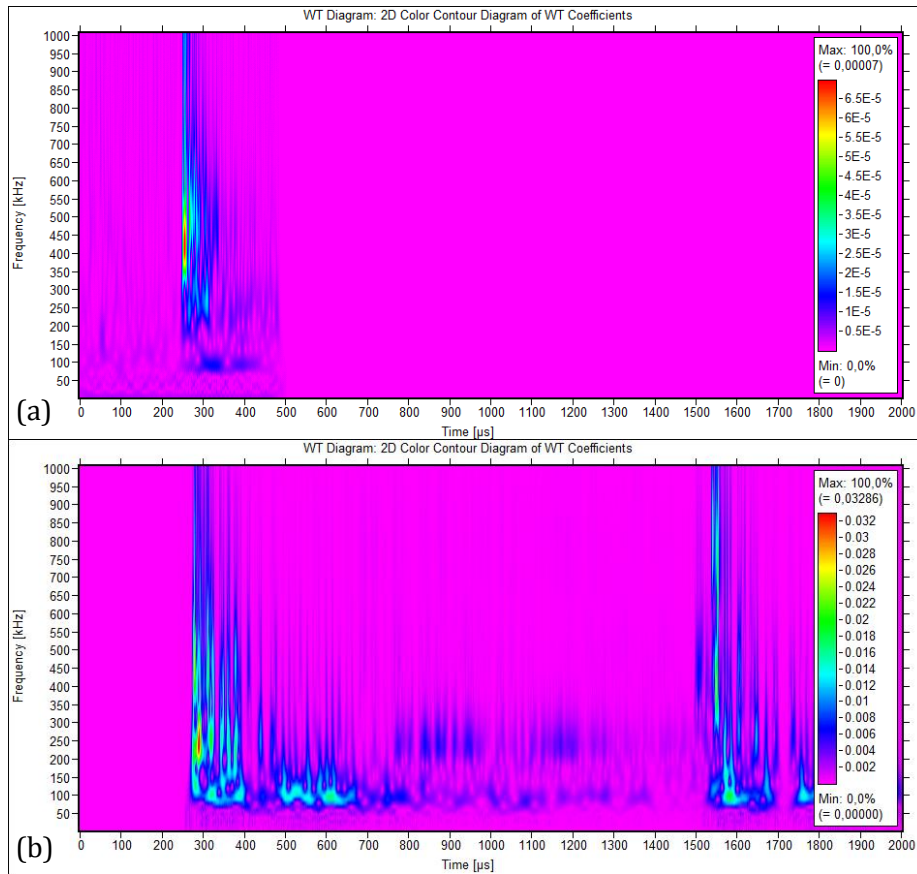


Figura 132: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a los mecanismos de daño tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote VU.

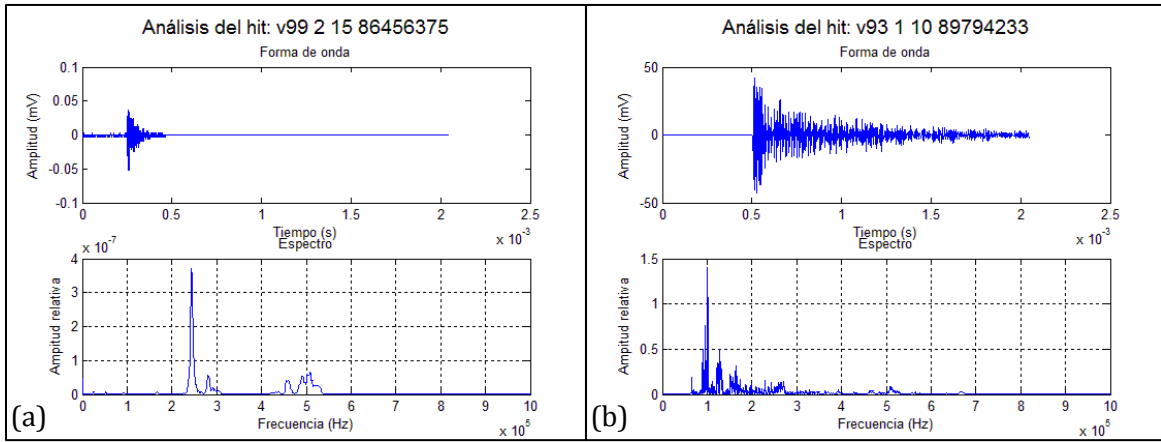


Figura 133: Formas de onda y espectros correspondientes a los daños tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote VB.

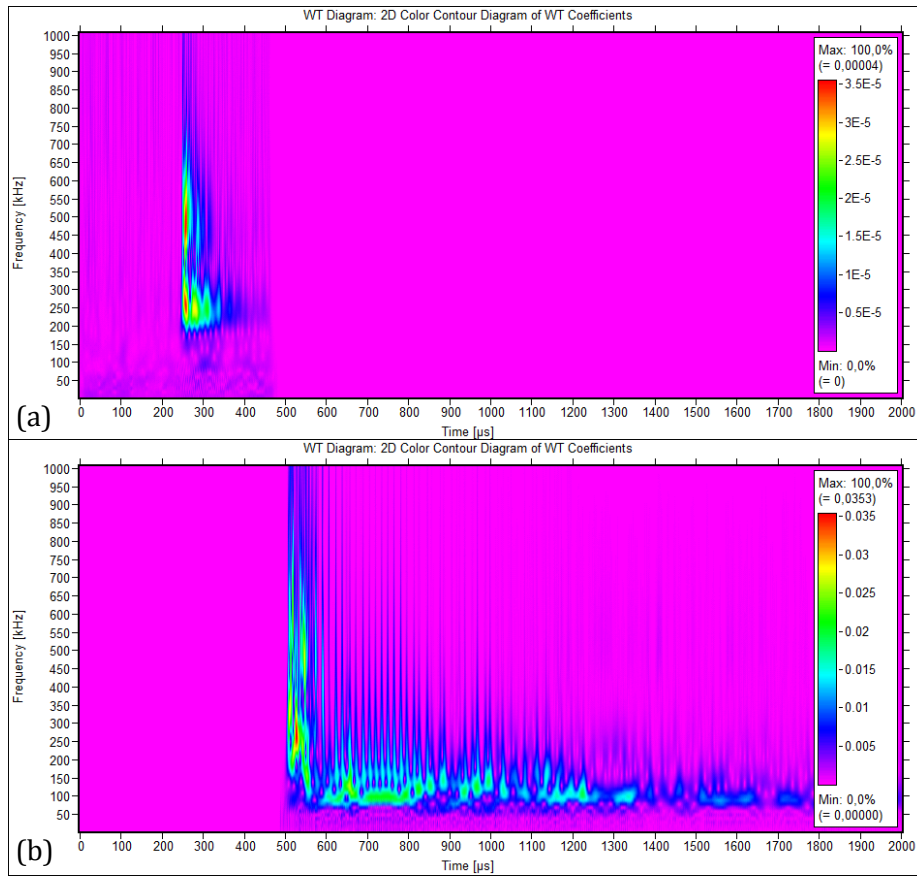


Figura 134: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a los mecanismos de daño tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote VB.

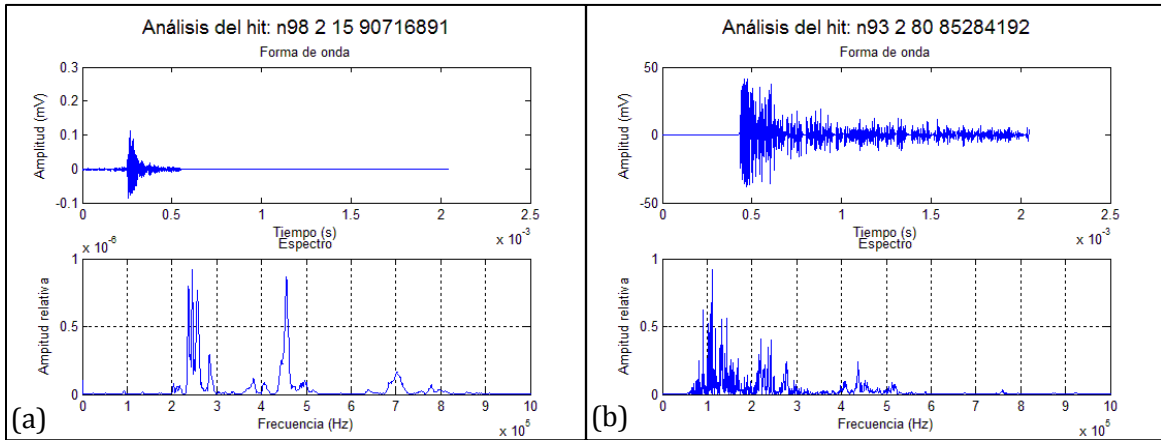


Figura 135: Formas de onda y espectros correspondientes a los daños tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote NB.

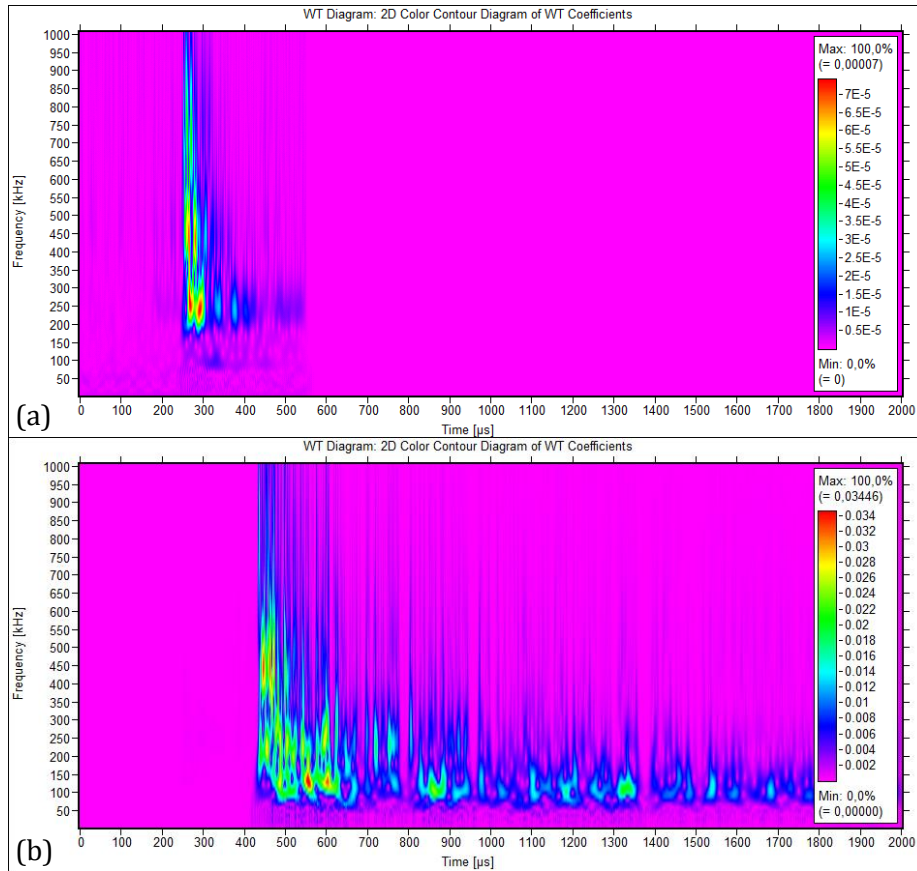


Figura 136: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a los mecanismos de daño tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote NB.

En el caso de las probetas del lote KB, los espectros (tanto de los mecanismos de daño tempranos como de los mecanismos de daño tardíos) presentaron un contenido muy rico en frecuencias que dificulta agruparlas en diferentes rangos, abarcando desde valores tan bajos como 80 kHz hasta valores cercanos a 1 MHz, probablemente

debido a la naturaleza más compleja de su construcción y a sus dimensiones. En términos generales, los picos más relevantes de los mecanismos tempranos se encuentran en promedio en 97, 143, 181, 237, 283, 334, 432 y 517 kHz, y para los mecanismos tardíos en 102, 148, 242, 281, 340, 462 y 506 kHz, pero se pueden extender hasta los 800 kHz o más. La Figura 137 demuestra lo extenso de los espectros característicos obtenidos en este lote de probetas.

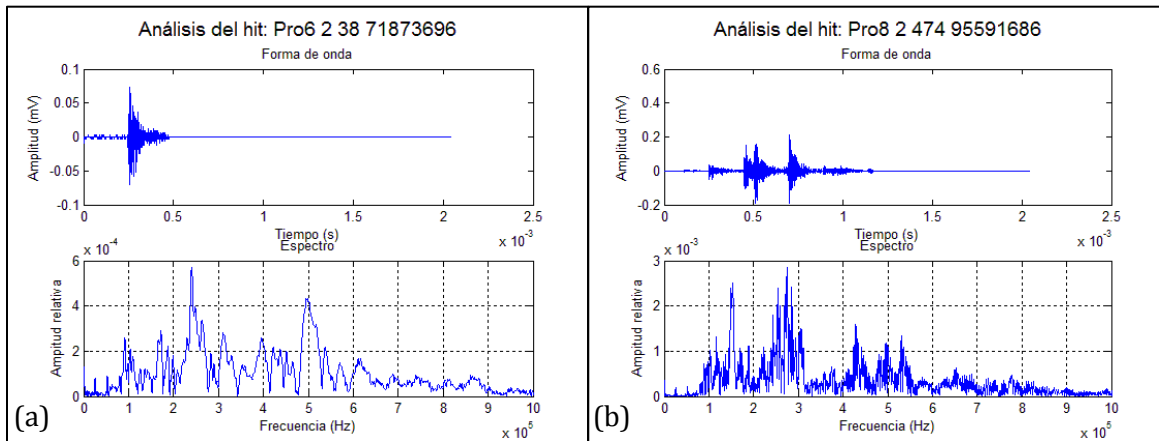


Figura 137: Formas de onda y espectros correspondientes a los daños tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote KB.

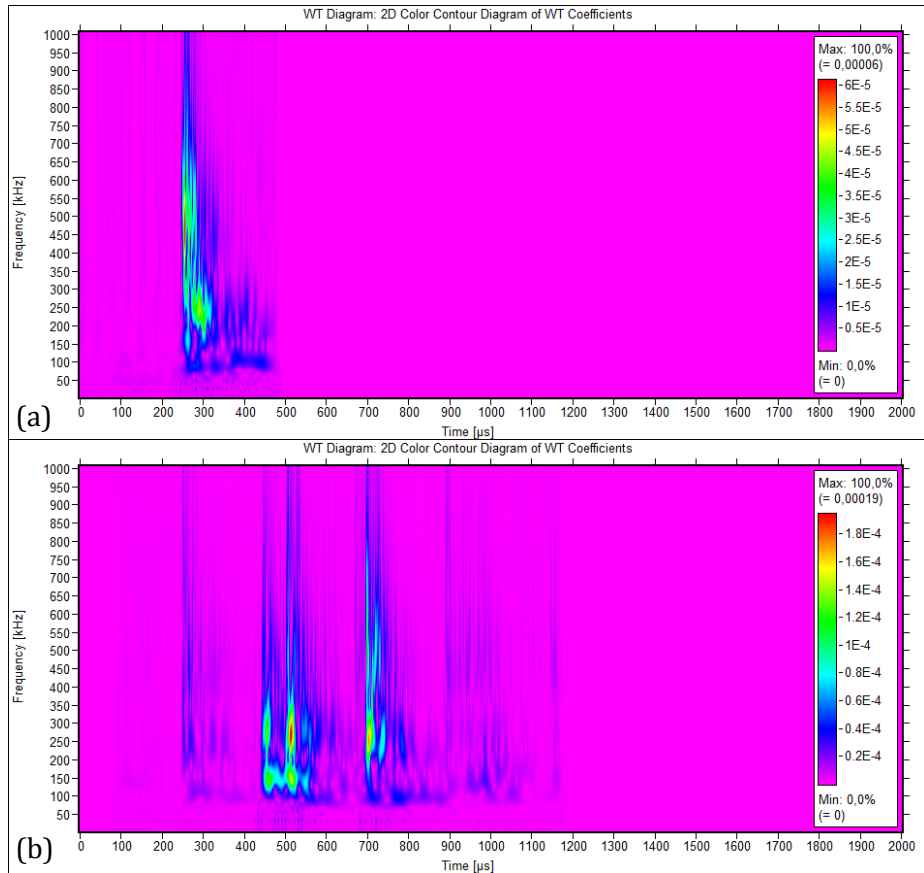


Figura 138: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a los mecanismos de daño tempranos (a) y tardíos (b) en probetas del lote KB.

El análisis del hit correspondiente a la micro rotura de fibras observada en las micrografías de la probeta VU7 (hit con 1028 cuentas y 103 dB) arrojó componentes frecuenciales importantes centrados en 92,5; 103,5; 130; 155,3; 176,7 y 251,5 kHz (Figura 139a), aunque el hit inmediatamente anterior (de 583 cuentas y 88 dB) captado por el otro canal (en teoría más cercano al sensor) mostró características generales distintas, con excitaciones de frecuencia que llegaron a abarcar la banda de 394 a 518 kHz (Figura 139b). Esto indica que para un mismo mecanismo de daño supuesto las señales pueden tener comportamientos frecuenciales inesperados debido a factores particulares como el comportamiento del daño a través del espesor [19,74] o la presencia y superposición de mecanismos no observados en las micrografías, por mencionar algunos.

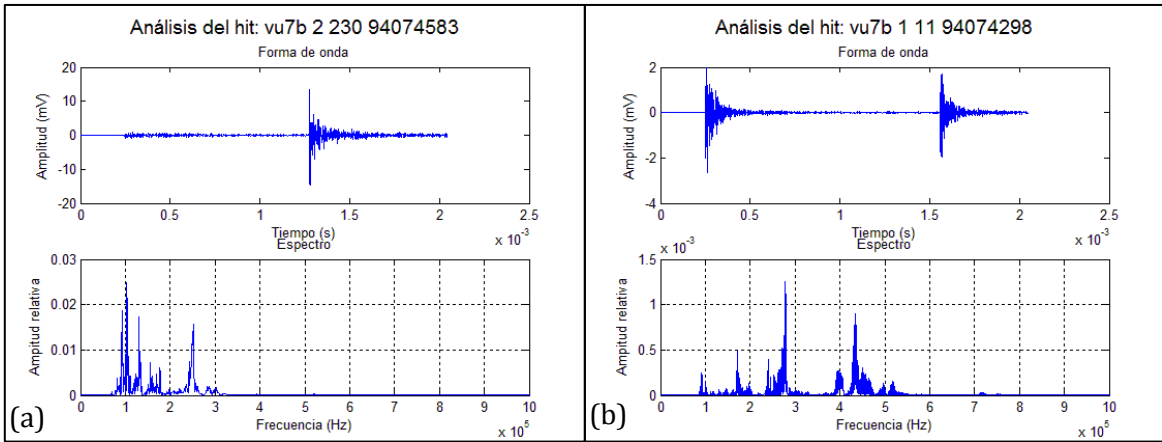


Figura 139: Formas de onda y espectros correspondientes a la micro rotura de fibras observada en las micrografías de la probeta VU7 (material vencido unidireccional). (a) Canal 2. (b) Canal 1.

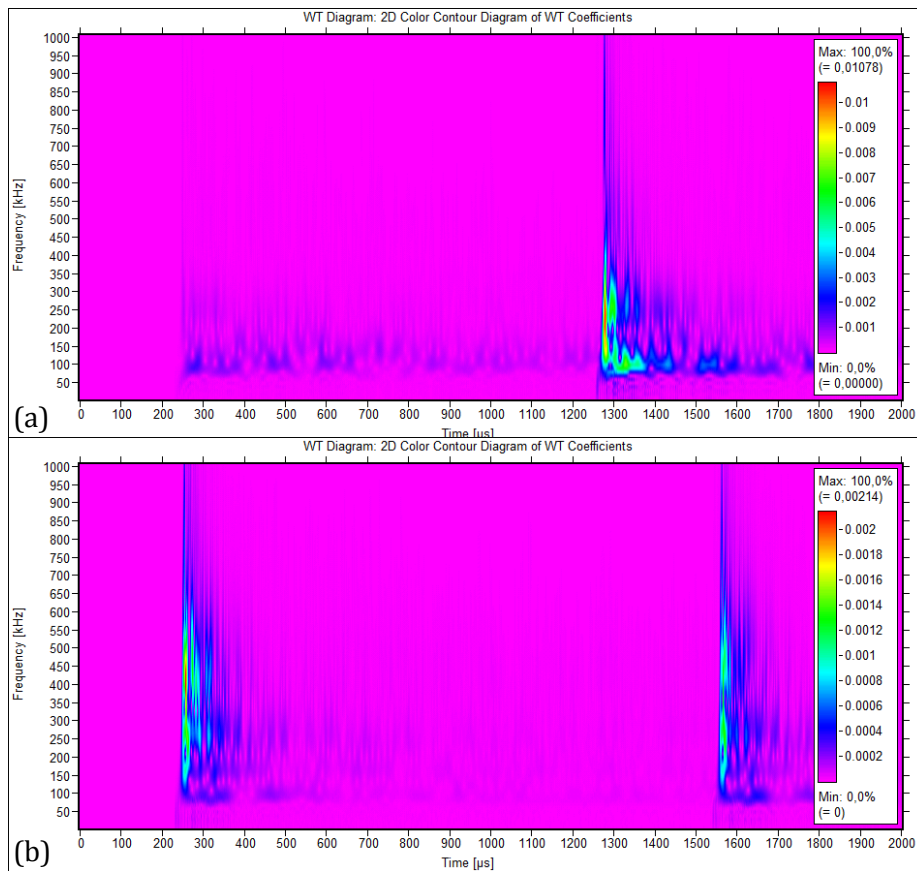


Figura 140: Análisis wavelets de las formas de onda correspondientes a la micro rotura de fibras observada en las micrografías de la probeta VU7 (material vencido unidireccional). (a) Canal 2. (b) Canal 1.

Los análisis por medio de Wavelets de todas las probetas confirmaron los rangos de frecuencia obtenidos usando la FFT y demostraron que la mayor parte del espectro se encuentra en los primeros 600 μ s de la señal, sin contenidos significativos por encima de 350 kHz pasado este tiempo.

5.6 IMÁGENES Y MICROGRAFÍAS

Las imágenes y micrografías revelaron, a nivel macro o micro, grietas longitudinales y transversales, deformaciones inelásticas, compresiones, tensiones, agrietamiento de la matriz, delaminaciones, rotura y escalonamiento de fibras, falta de fibras, porosidades y ayudaron a determinar el porcentaje de fibra y resina entre las distintas probetas de todos los lotes ensayados.

Como primera medida se tomaron fotografías digitales de las probetas en una inspección visual a ojo desnudo (Figura 141). Por medio de estas imágenes se pudieron observar las marcas de la nariz de carga (así como su alineación respecto del ancho y el largo), las fisuras y quiebres producidos durante los ensayos y los modos de falla típicos que permitieron clasificarlos, según la norma ASTM D 2344-00, en: corte interlaminar, flexión, o deformación inelástica (según Figura 22).

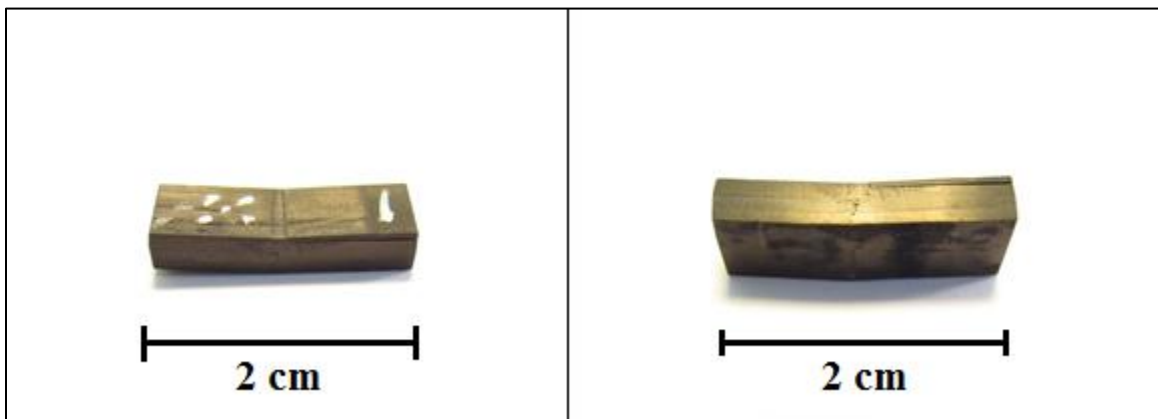


Figura 141: Ejemplo de fotografías digitales de las probetas ensayadas. En la imagen de la derecha se observan daños de compresión, tensión y corte interlaminar.

Posteriormente se inspeccionaron algunas probetas con lupa obteniendo imágenes más detalladas de la superficie de las probetas, analizando las distintas zonas afectadas (Figura 142 y Figura 143). Estas imágenes permitieron observar los daños de manera más detallada, sobre todo en las probetas que no sufrieron de forma tan severa los efectos de la flexión.

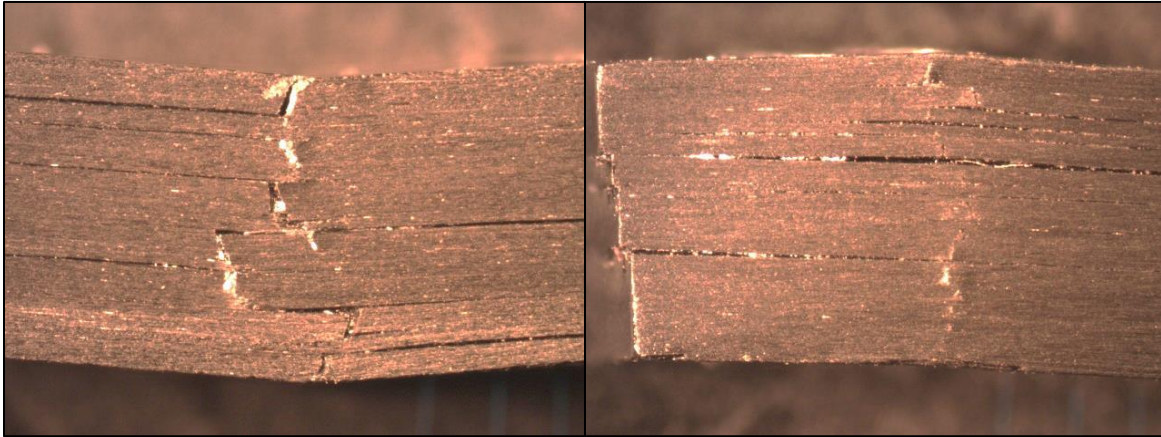


Figura 142: Imágenes con lupa de las probetas del lote NUar luego de ser ensayadas, vistas frontales.

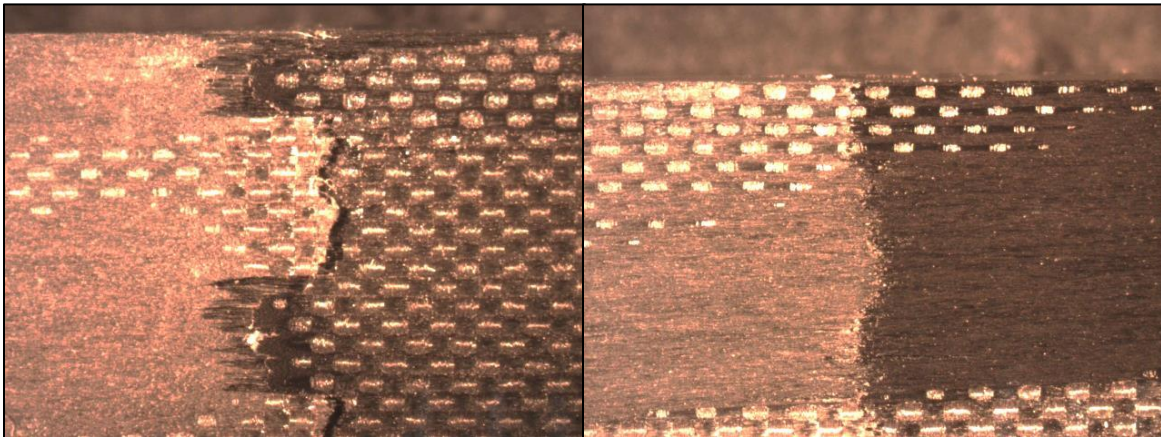


Figura 143: Imágenes con lupa de las probetas del lote NUar luego de ser ensayadas, vistas posteriores.

Finalmente, tras haber finalizado el pulido de las probetas seleccionadas con pasta de diamante de 1 micrón, se tomaron las imágenes con el microscopio óptico. Para la elección de las probetas a las que se les tomaron micrografías se tuvo en cuenta que, dados los resultados mecánicos, las probetas del lote VU pueden considerarse como parte del lote NUar, y las probetas del lote VB pueden considerarse parte del lote NB. La Tabla X resume las probetas que fueron micrografiadadas de cada lote y la razón de su elección por sobre las otras.

Tabla X: Motivos de elección de las probetas micrografadas.

Nombre del lote	N° de probeta	Motivo de elección
NUar _{SEA}	1	Mayores daños visibles
	7	Mayor P_{max}
	9	Evaluar % de fibra y resina (vista vertical)
NUar _{CEA}	1	Menor P_{max}
	2	Muchos daños a lo largo de 3 cargas, registrados con EA
	4	Mayor P_{max}
	7	P_{max} promedio
VU	6	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
	7	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
	8	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
VB	4	Varios eventos de EA audibles luego de detenerse la carga
	6	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
	8	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
NB	9	Detención de la carga antes de alcanzarse la P_{max}
KB	3	Menor P_{max}
	4	Mayor P_{max}
	5	P_{max} promedio
	6	Probeta menos dañada
KC	3	Probeta menos dañada
	6	Menor P_{max}
	7	P_{max} promedio y EA interesante
	8	Mayor P_{max}
	10	Evaluar vista en vertical

Para calcular el porcentaje de fibra y resina de las probetas, se tomaron como referencia probetas cuyas micrografías presentaban a las fibras de cara al lente (en el caso de las probetas bidireccionales, se calculó sobre las capas en las que las fibras se veían de frente) y sobre sus imágenes se dibujaron dos líneas diagonales paralelas y una oblicua a ellas, todas de longitud unitaria, y se la dividió conforme estas cortaban o no a las fibras. Teniéndola dividida en secciones según las zonas que cruzaban, se sumó la longitud total de partes que cruzaban fibra y resina respectivamente y se calculó en base al total el porcentaje de fibra y resina de cada línea. Luego por medio de un promedio entre las tres se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla XI. En las probetas del lote KC, las fibras y la resina estaban distribuidas de forma despareja, con zonas que presentaban gran acumulación de fibras y zonas en las que la falta de fibras se hacía evidente, además de existir regiones con alto contenido de porosidades (Figura 167 y Figura 168). Esto no ocurre en las probetas de los otros lotes debido a la diferencia entre los procesos de fabricación por laminación manual con bolsa de vacío y el filament winding, y por esta razón en las probetas curvas no se calculó el porcentaje de fibra y resina.

Tabla XI: Porcentaje de fibra y resina en los lotes de probetas analizados.

Nombre del lote	Porcentaje de fibra	Porcentaje de resina
NUar	75,7	24,3
VB	66,0	34,0
NB	71,6	28,4
KB	68,7	31,3

En las figuras 144 a 168 se presentan las imágenes más relevantes de cada lote.

En la probeta NUar_{SEA}7, que fue la que tuvo la mayor resistencia dentro de su grupo, sólo se observaron dos delaminaciones y una grieta vertical que comienza en el centro de la probeta, la cual generó rotura de fibras y contribuyó al comienzo de la delaminación a la cual está asociada (Figura 144). A su vez, en la probeta NUar_{CEA}4, que también presentó la mayor resistencia dentro de su grupo, los únicos daños observados fueron una rotura de fibras interna en el centro de la probeta (Figura 145b) y dos delaminaciones, una de ellas la delaminación principal asociada a la rotura de fibras mencionada que se extiende hasta el borde del espécimen.

La probeta NUar_{SEA}5 fue la que presentó los mayores daños dentro de su grupo. El comportamiento a la rotura de esta probeta es el característico de las probetas de CFRP con matriz de cianato éster. En ella se pudo observar el punto medio de la flexión, y cómo avanza la grieta central creando delaminaciones que se propagan hacia los costados. Las fuerzas de compresión superiores y de tracción inferiores son las que generan la rotura de fibras, y crean a veces escalonamientos de fibras como los que se observan en la parte superior de la Figura 146a.

La vista de la probeta NUar_{CEA}9 con las fibras apuntando al lente muestra dos grietas transversales (respecto de la dirección de aplicación de la carga) que son producto de las delaminaciones del tipo que se observaron en las probetas anteriores y que llegan hasta el borde de las mismas (Figura 147). Con esta figura fue posible calcular el porcentaje de fibra y resina de las probetas del lote NUar.

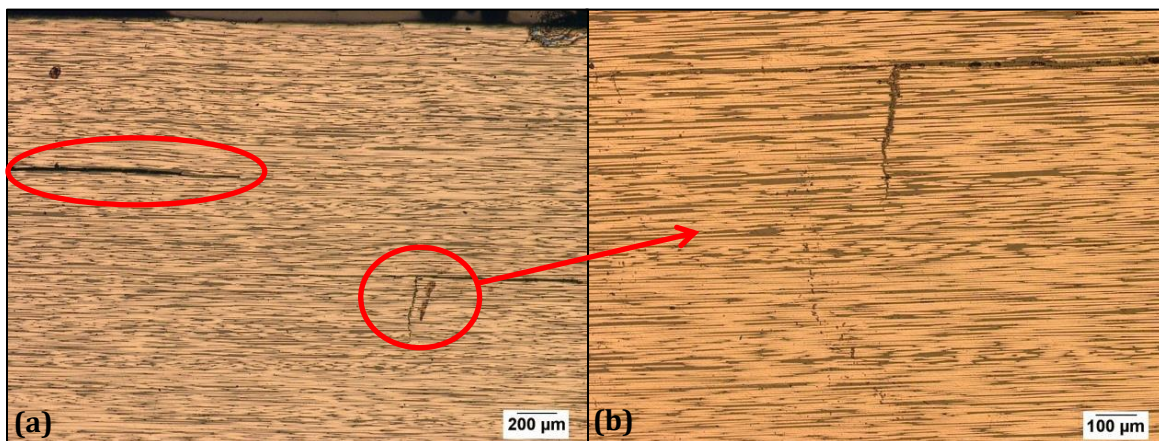


Figura 144: Daños en la probeta NUar_{SEA}7. (a) Delaminaciones y rotura de fibras. (b) Zona ampliada de la rotura de fibras.

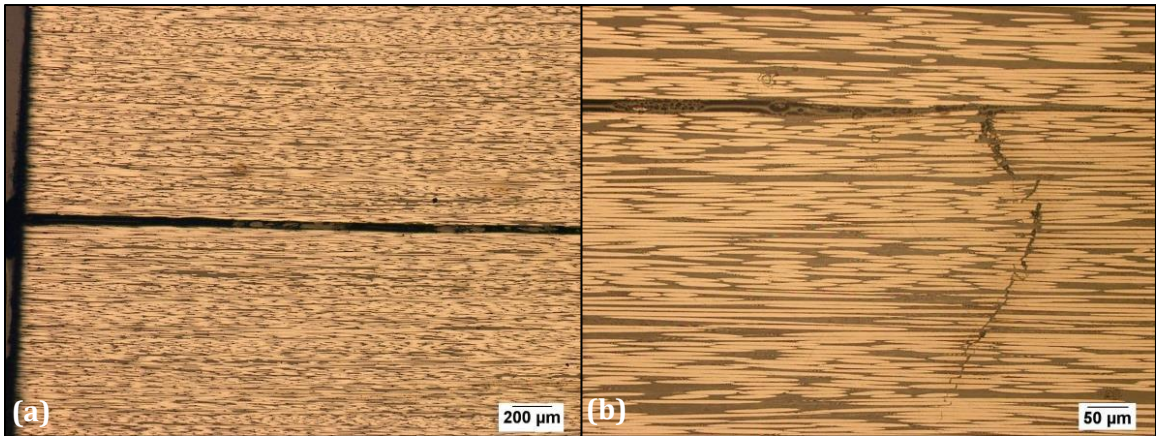


Figura 145: Daños en la probeta NUar_{CEA4}. (a) Delaminación. (b) Zona ampliada del comienzo de la delaminación, con rotura de fibras asociada.

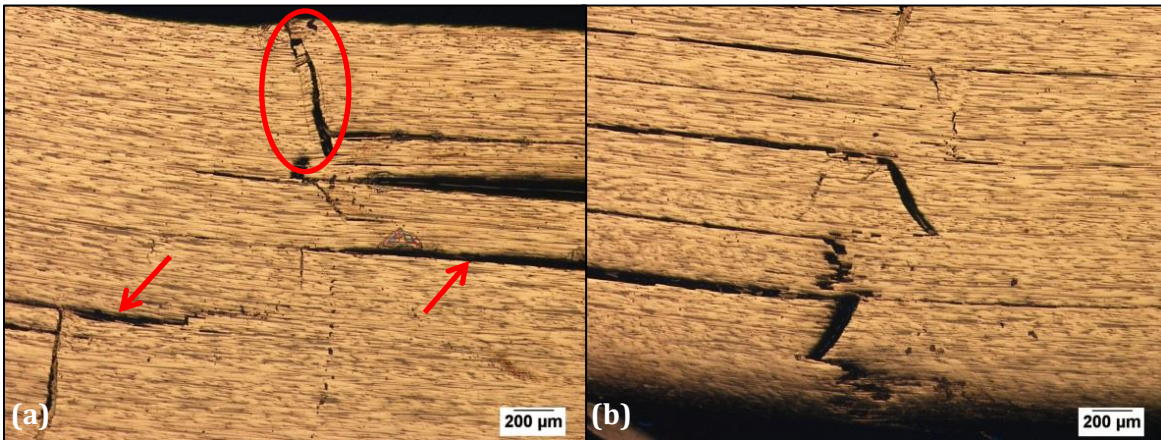


Figura 146: Daños en la probeta NUar_{SEA5}. (a) Rotura y escalonamiento de fibras su parte superior; delaminaciones. (b) Rotura de fibras y delaminaciones en su parte inferior.

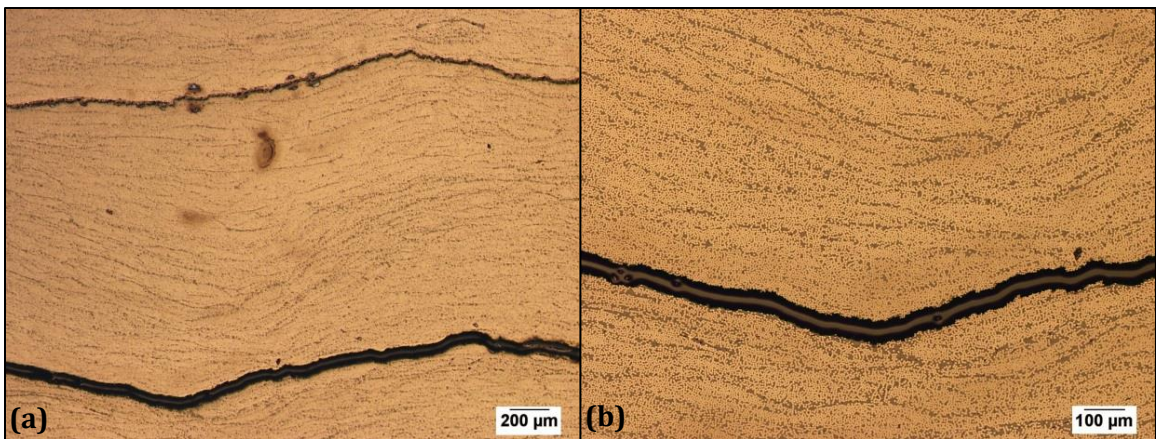


Figura 147: Vista frontal de los daños en la probeta NUar_{CEA9}. (a) Grietas transversales. (b) Zona ampliada de la grieta transversal inferior.

La probeta NUar_{CEA}7 tuvo una resistencia promedio dentro de su grupo, y en su micrografía se observaron delaminaciones (que alcanzan los bordes de la probeta y lo fragmentan), y la grieta central avanzada que le da inicio a las mismas (Figura 148). También se puede observar en detalle el escalonamiento de fibras en la zona de compresión de la probeta producto de la dislocación que el movimiento de segmentos produce durante la flexión (Figura 148c), fenómeno que no se produce en el cuerpo o en la zona de tracción de la probeta.

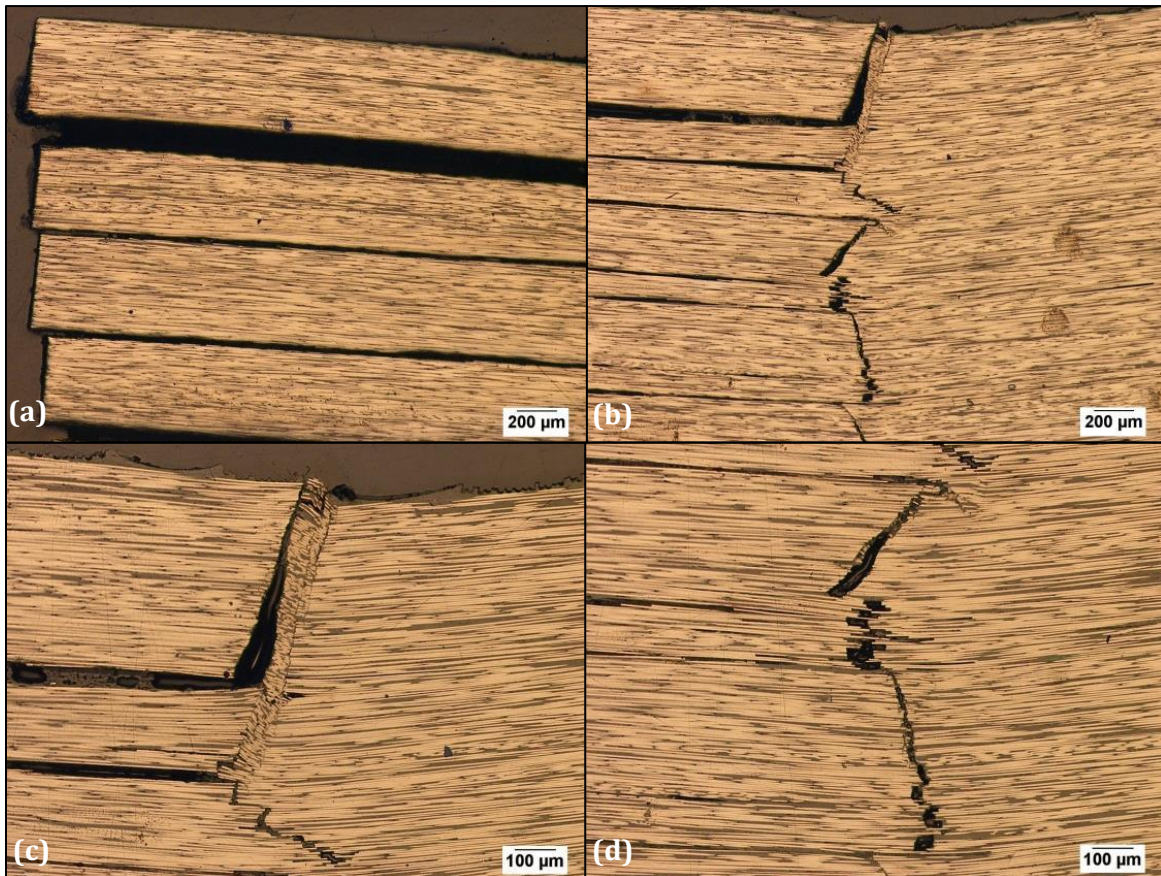


Figura 148: Daños en la probeta NUar_{CEA}7. (a) Delaminaciones en el borde izquierdo de la probeta. (b) Inicio de las delaminaciones en el centro de la probeta. (c) Escalonamiento de fibras bajo el punto de contacto con la nariz de carga. (d) Zona ampliada de la rotura de fibras en el cuerpo de la probeta.

En las micrografías de la probeta NUar_{CEA}2 se pudo observar el avance del daño hasta etapas más avanzadas que en el resto de los especímenes, debido a que esta probeta recibió tres cargas consecutivas y por lo tanto se exigió mecánicamente mucho más que las otras. La grieta central es más ancha, se unen más roturas de fibras con las delaminaciones y estas últimas se separan más, comenzando a tener el material fragmentado en pedazos, los cuales hasta se separan del cuerpo de la probeta (Figura 149).

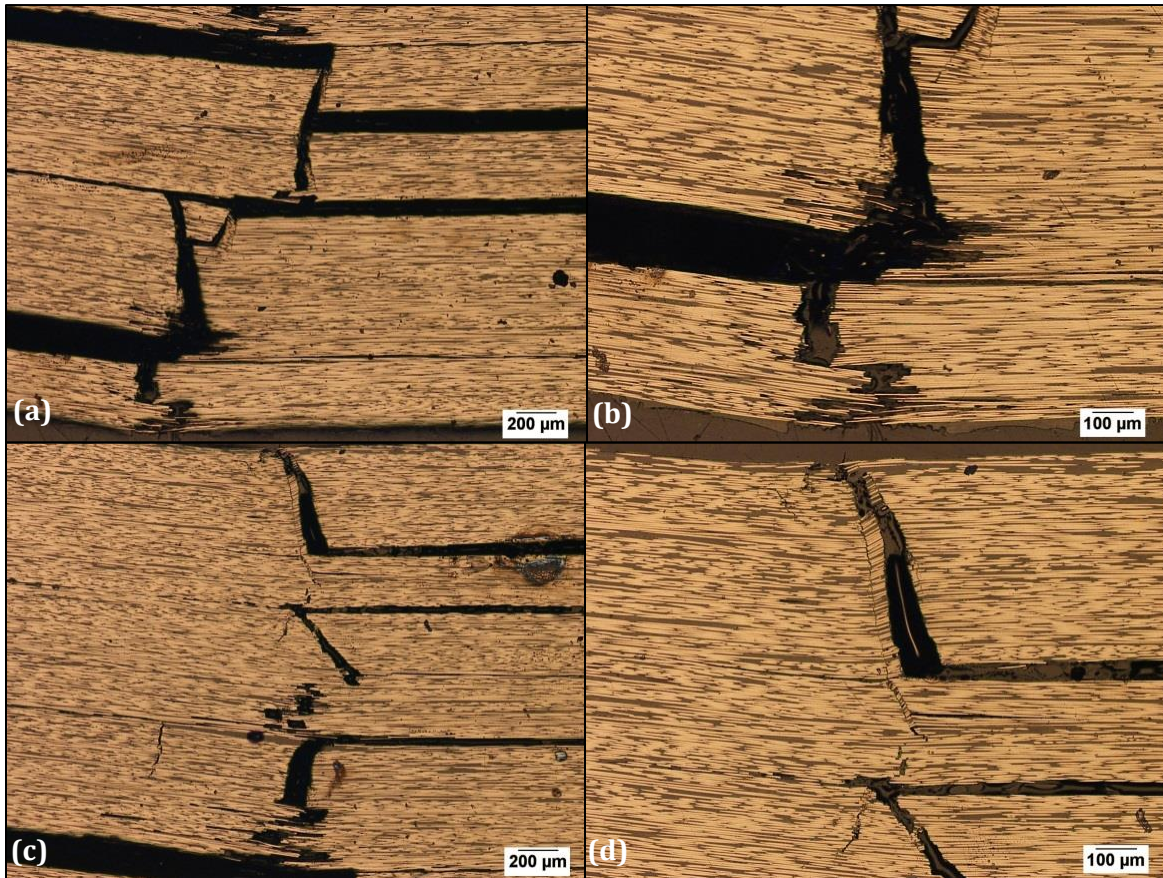


Figura 149: Daños en la probeta NUar_{CEA2}. (a) Daños mayores en la parte centro inferior de la probeta. (b) Zona ampliada de estos daños. (c) Rotura de fibras comenzando bajo el punto de apoyo de la nariz de carga. (d) Zona ampliada de la rotura de fibras comenzando bajo el punto de apoyo de la nariz de carga; pequeño escalonamiento de fibras.

Las imágenes de la probeta NUar_{CEA1} mostraron claramente la grieta central principal y las grietas secundarias que se abren en los puntos de apoyo laterales, siendo este el espécimen que presentó la menor resistencia de todos, notándose la forma de la flexión (deformación inelástica), y cómo avanza la grieta separando las fibras y creando delaminaciones que se propagan hacia los costados. En la grieta central no se observaron muchas fibras escalonadas, pero en la grieta lateral del punto de apoyo apareció más este fenómeno (Figura 150 y Figura 151).

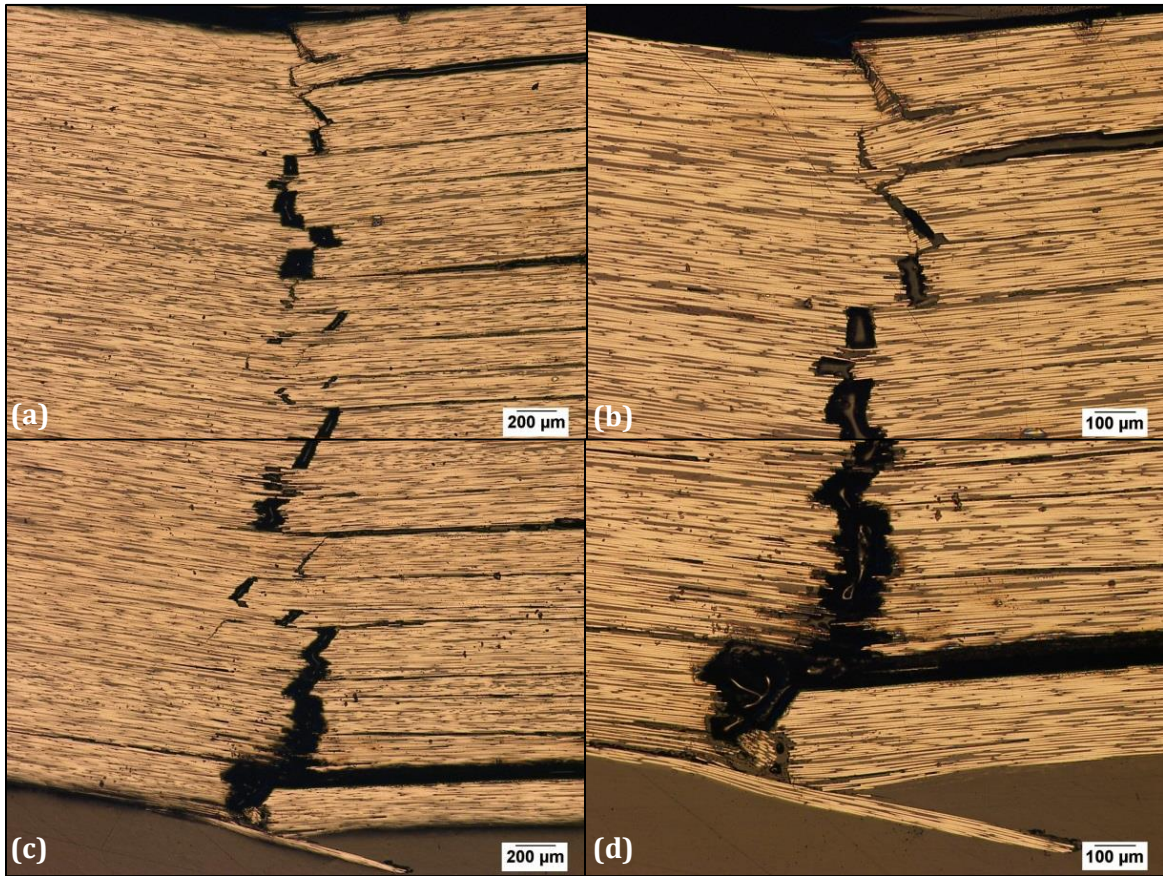


Figura 150: Daños en el centro de la probeta NUar_{CEA1}. (a) y (c) Zonas superior e inferior respectivamente. (b) y (d) Aumentos sobre el comienzo y final de la grieta.

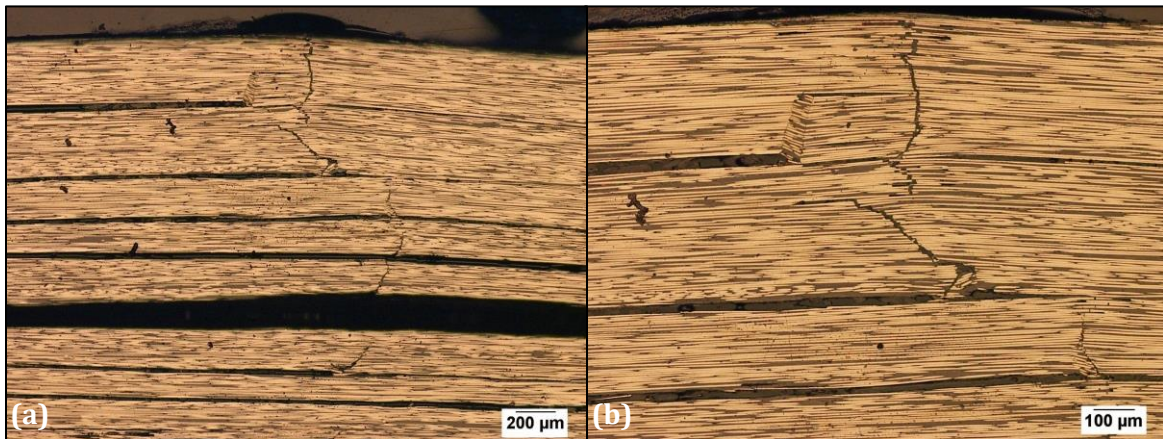


Figura 151: Daños por sobre el punto de apoyo izquierdo de la probeta NUar_{CEA1}. (a) Rotura de fibras y delaminaciones. (b) Zona ampliada de estos daños; pequeño escalonamiento de fibras en el inicio de una delaminación.

A continuación se analizan las micrograffas de las probetas en las que la flexión se detuvo momentos antes de alcanzar la P_{max} .

En la Figura 152, correspondiente a las micrográficas de las probetas VU6 y VU8, se muestra que no se observaron daños apreciables en estos cupones a pesar de que la EA detectó eventos correspondientes a la iniciación de los daños menores en ellos. Esto indica que los mismos son despreciables y no tienen un tamaño importante observable con estos aumentos, o bien que los daños se cierran al relajar la carga (por ejemplo procesos de cierre de fisuras [79]), como podría ocurrir con las delaminaciones menores. De cualquier manera, estos daños no representan ningún riesgo para la salud estructural del material, cuando se lo somete a un proceso de flexión que induce una carga por debajo de su resistencia máxima a esta alteración.

A su vez, en la Figura 153, se muestra el único daño observado en la probeta VU7, el cual generó un evento de EA más importante que sus predecesores y que es un claro ejemplo de la iniciación del daño en las probetas que en pocas fracciones de segundo puede convertirse en el daño mayor e irreversible que se produce al alcanzar la P_{max} , siendo el último indicador de la proximidad prácticamente inmediata del comienzo de los daños mayores. Como se comprobó, este daño es una micro rotura de fibras, ubicada en la zona de compresión en contacto con la nariz de carga. De esta manera, se concluye que el primer daño que ocurre justo antes de la falla irreversible del material (que se produce al alcanzar la P_{max}), es la micro rotura de fibras en la zona de contacto con la nariz de carga. Este daño luego se extenderá por el espesor de la probeta y creará delaminaciones a sus costados, que se propagarán hacia los laterales, y con el avance de la carga separarán fragmentos de material como se apreció en las probetas más exigidas.

El agrietamiento de la matriz no fue observado en las probetas unidireccionales.

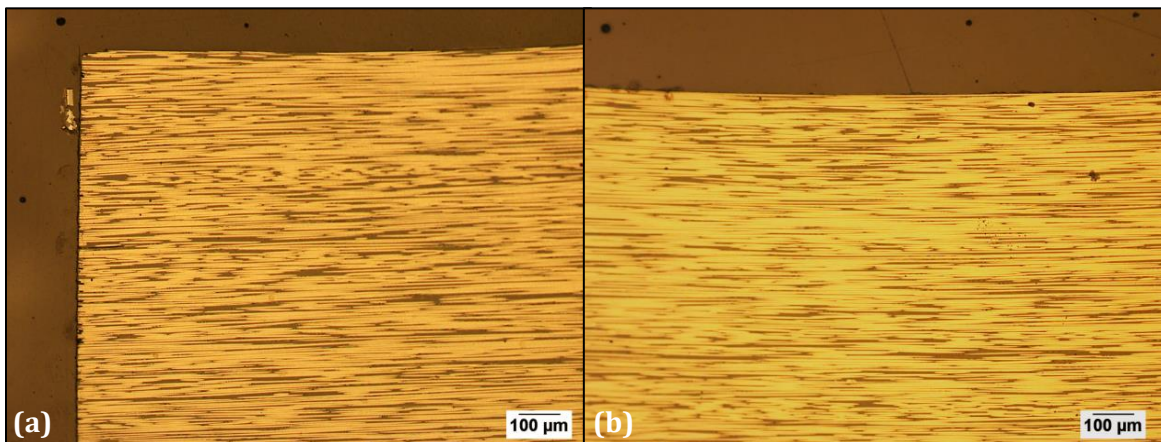


Figura 152: Micrográficas de las probetas VU6 (a) y VU8 (b). No se observaron daños en ninguna zona de las mismas.

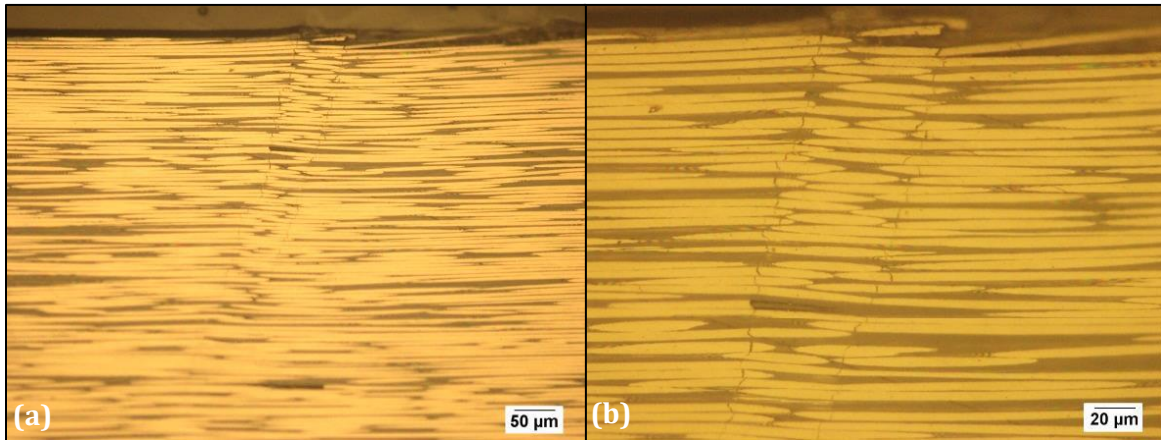


Figura 153: Micrografía en el centro superior de la probeta VU7. (a) Micro rotura de fibras. (b) Aumento sobre la micro rotura de fibras.

Las Figura 154 a Figura 156 muestran las micrografías de la probeta VB4, que presentó tres eventos de EA durante los ensayos luego de detenerse la carga, manifestándose como explosiones o roturas audibles durante la carga estática. Las micrografías mostraron delaminaciones de distintas longitudes, que pueden llegar o no hasta el borde exterior de la probeta, y que son tanto inter como intra laminares (Figura 154a y Figura 154b). También se observaron micro y macro agrietamientos de la matriz, especialmente en el centro de la probeta (cerca de la zona de carga), y roturas de fibras localizadas en la misma zona. El agrietamiento transversal se expande y se une con las delaminaciones al avanzar el daño (Figura 154b y Figura 155). Los eventos de EA posteriores a la carga máxima, producidos por el acomodamiento del material y las interacciones entre las capas del laminado, podrían ser propagaciones espontáneas de estas delaminaciones observadas, expansión del agrietamiento mayor de la matriz, o quizás las roturas de fibras, sin descartar la posibilidad de que sucedan varios de estos fenómenos al mismo tiempo.

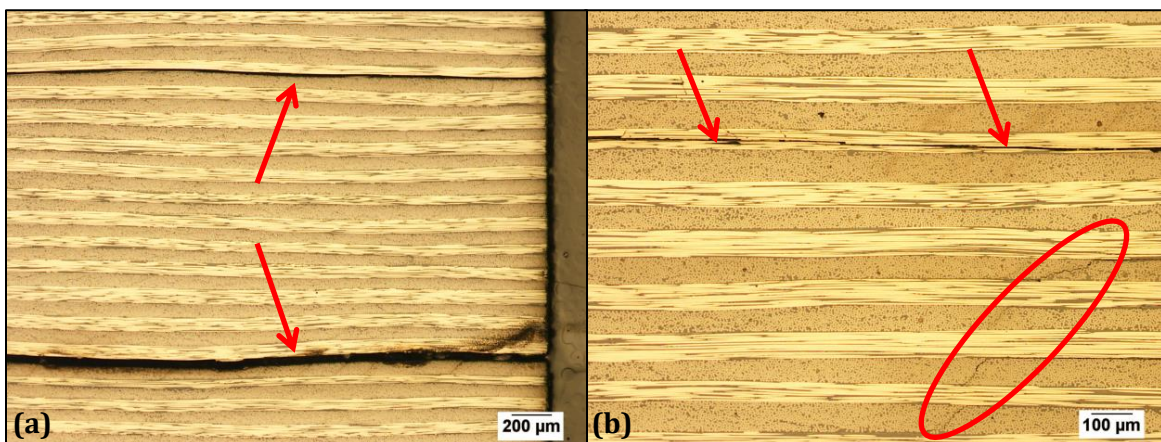


Figura 154: Daños en la probeta VB4. (a) Delaminaciones intra laminares. (b) Delaminación inter laminar y agrietamiento de la matriz.

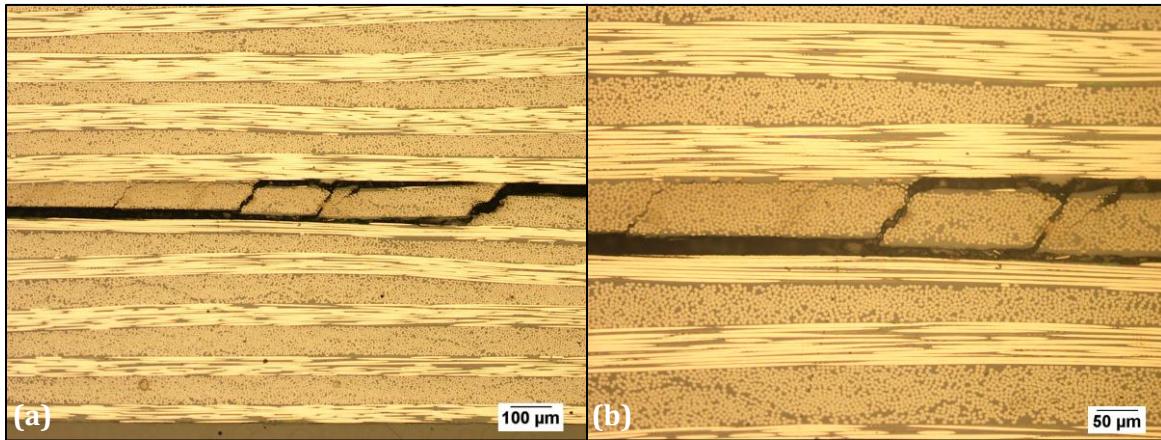


Figura 155: Daños en la probeta VB4. (a) Agrietamiento mayor de la matriz unido a delaminaciones. (b) Aumento de la zona dañada.

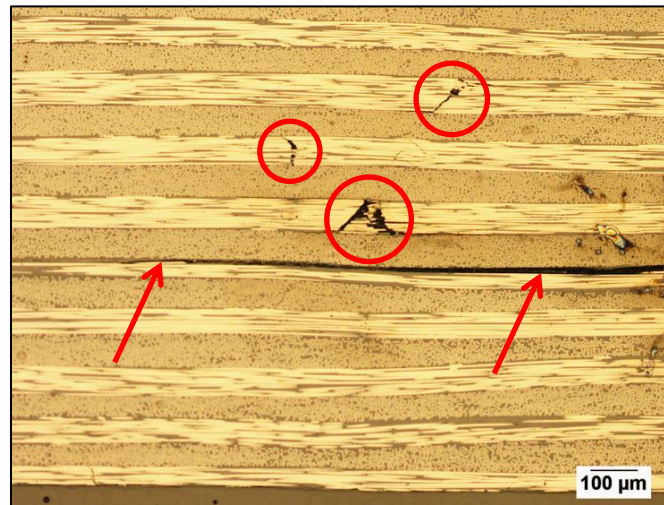


Figura 156: Daños en la probeta VB4, zona centro inferior. Rotura de fibras localizadas y delaminación.

El hecho de que en las probetas unidireccionales no se observara agrietamiento de la matriz y sí se apreciara en las probetas bidireccionales puede estar relacionado a que según los resultados de Fotouhi *et al.* [73], el mecanismo de fractura dominante en las muestras unidireccionales es la rotura de fibras, mientras que en las muestras bidireccionales es el agrietamiento de la matriz.

Las imágenes en microscopio óptico de las probetas bidireccionales en las que la carga se detuvo momentos antes de alcanzar la P_{max} se presentan en las Figura 157 a Figura 163.

En la probeta NB9 se observaron pequeñas delaminaciones (inter e intra laminares), que se considera que es la delaminación menor de la que hablan Fotouhi *et al.* [14, 73] en la bibliografía, y pequeñas roturas de fibras en la superficie del laminado. Estas últimas pueden estar favorecidas en su aparición por el hecho de que, al ser un laminado bidireccional, hay menos cantidad de fibras soportando la presión de la nariz de carga, y por lo tanto serán más frecuentes que en un laminado

unidireccional. En el resto de la probeta, no se observaron daños (Figura 159), excepto pequeños quiebres de fibras en los laterales de la misma que son atribuidos al mecanizado previo a los ensayos. Por su parte, en la probeta VB6 se observaron los mismos daños que en el caso previo (Figura 160 y Figura 161) y se desprenden las mismas conclusiones, y en la probeta VB8 casi no se encontraron daños, sólo pocas delaminaciones menores (Figura 162 y Figura 163).

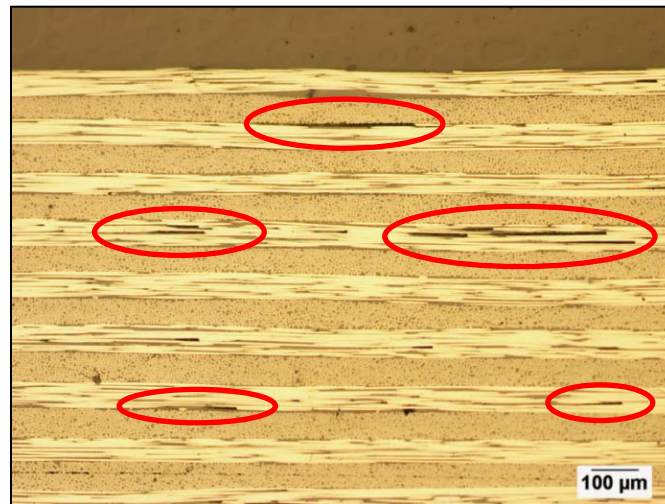


Figura 157: Delaminaciones menores en la parte superior de la probeta NB9.

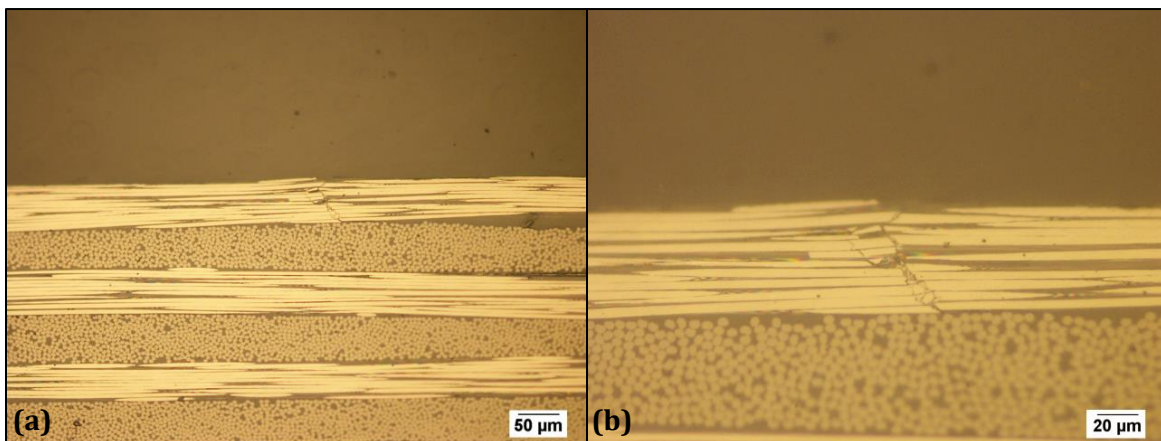


Figura 158: Micro rotura de fibras en la probeta NB9. (a) Aumento 20X. (b) Aumento 50X.

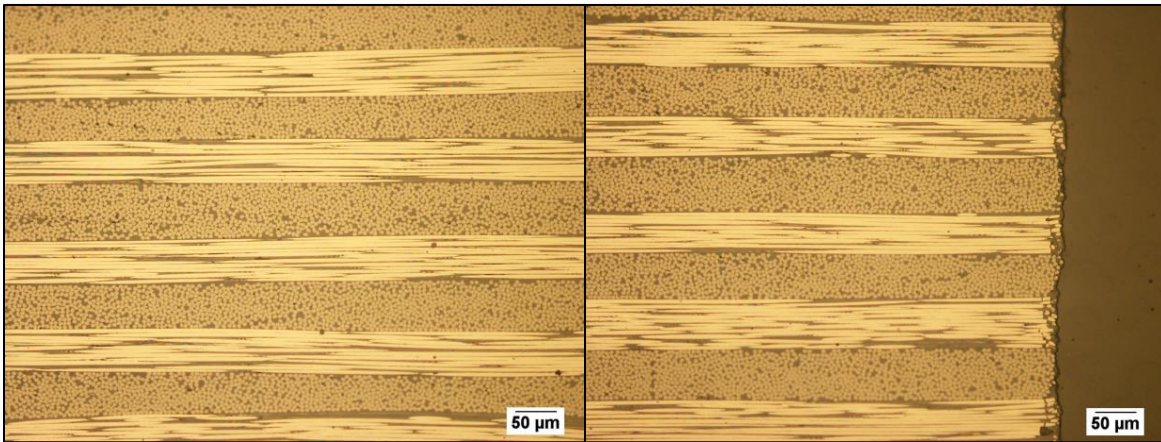


Figura 159: Estado del material en el centro (a) y el borde (b) de la probeta NB9. No se observan las delaminaciones menores y micro roturas de fibras que se forman en la parte superior de la probeta.

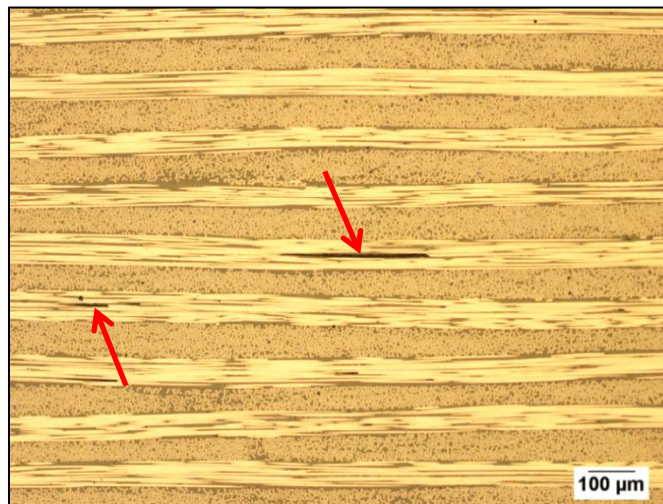


Figura 160: Pocas delaminaciones menores en la parte centro superior de la probeta VB6.

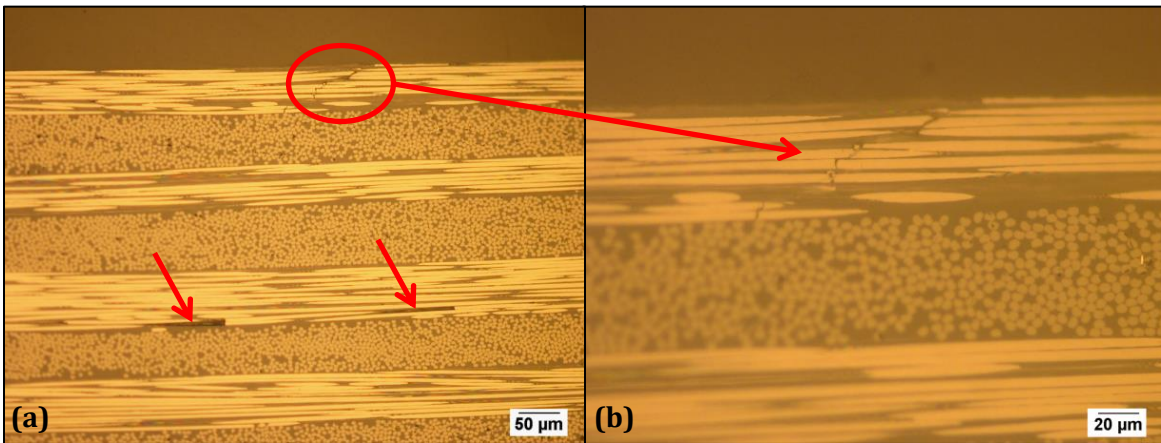


Figura 161: Delaminaciones menores y micro rotura de fibras en la parte centro superior de la probeta VB6 (a) y aumento sobre la micro rotura de fibras (b).

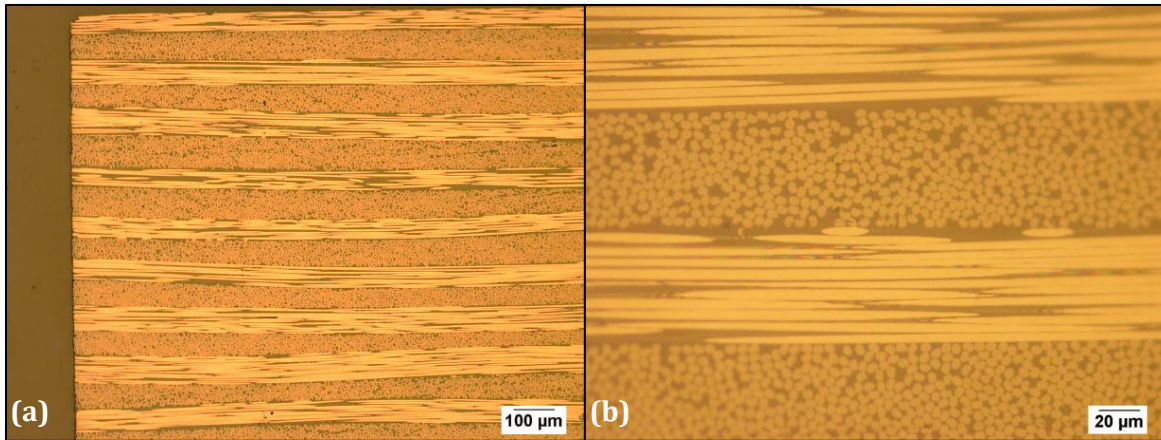


Figura 162: Micrografías de la probeta VB8. (a) Algunas delaminaciones menores en el borde izquierdo superior de la probeta. (b) Zona aumentada sin daños.

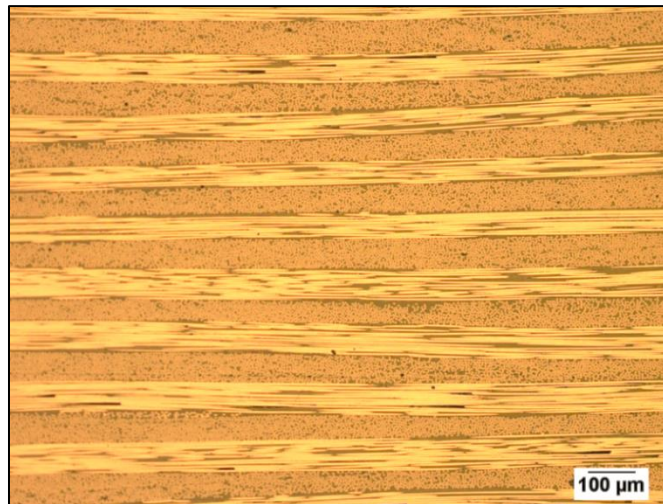


Figura 163: Delaminaciones menores en el centro de la probeta VB8.

En las micrografías de las probetas del lote KB se pudieron observar 32 capas de fibra y resina apiladas en una secuencia de $[0/90]_s$, con dos capas consecutivas en la misma dirección en el centro de las probetas, y las fibras de vidrio entretejidas propias del proceso de construcción utilizado por el fabricante.

Respecto a los daños, se pudieron ver grietas ondulares a lo largo de los refuerzos recorriendo de manera transversal las fibras (visibles también a simple vista), microfisuras de la matriz, deformación de las capas y rotura de fibras en las probetas.

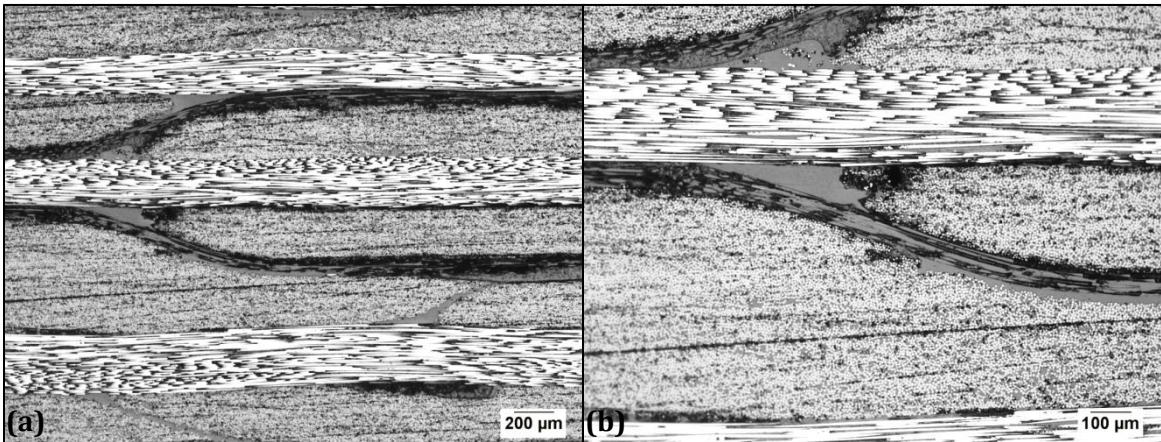


Figura 164: (a) Grietas ondulares transversales a las fibras. La rotura se propaga siguiendo estas líneas. (b) Detalle de las grietas ondulares.

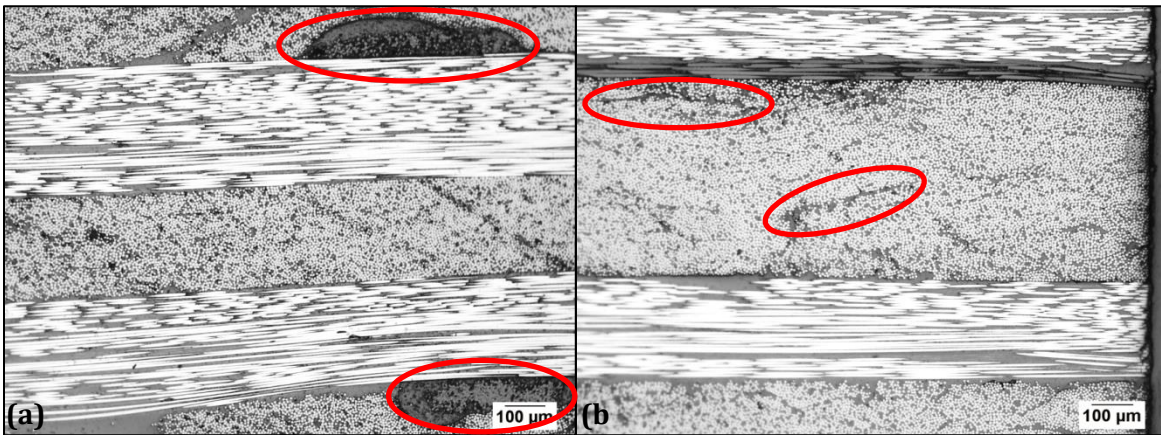


Figura 165: (a) Fibras de vidrio entretejadas entre las capas del compuesto. (b) Microfisuras en capa central al borde de la probeta.

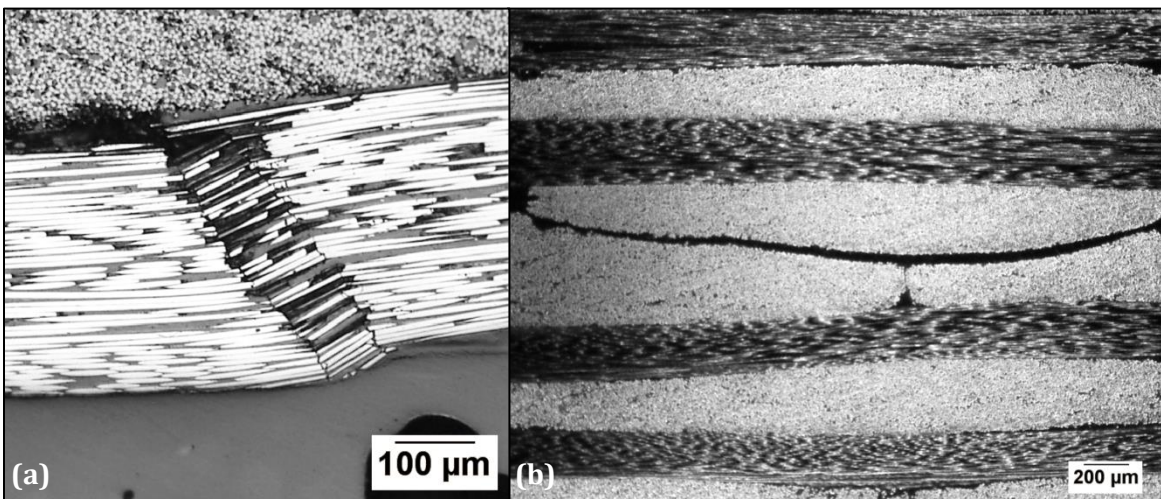


Figura 166: (a) Rotura de fibras de forma escalonada en el borde de la probeta, posible cercanía con un punto de apoyo. (b) Grietas transversales y delaminación en el compuesto, luz en incidencia lateral.

Las micrografías del lote KC mostraron 13 pasadas de fibras durante la fabricación del tubo (no necesariamente en 13 direcciones diferentes) y revelaron fisuras que son tanto macro fisuras como micro fisuras, porosidades, zonas con falta de fibra, delaminaciones, dislocaciones y rotura de fibras.

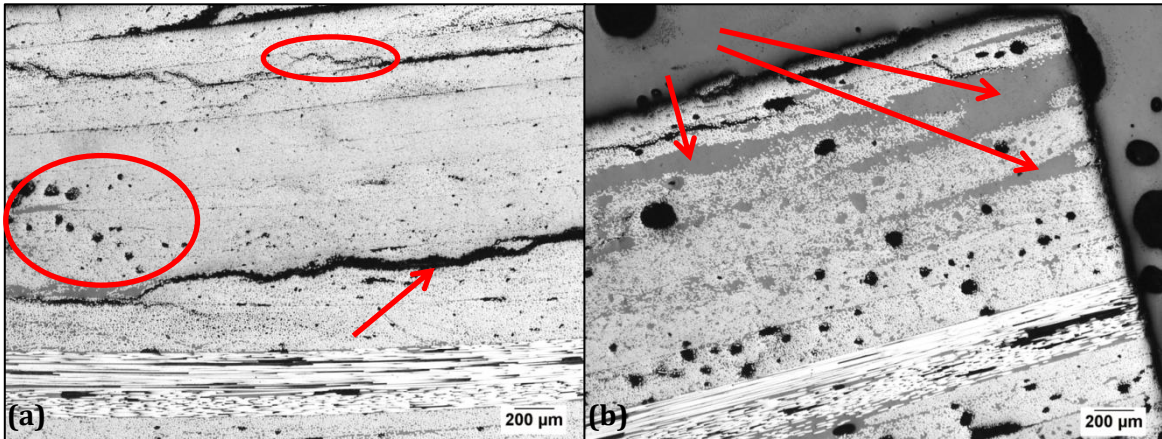


Figura 167: (a) Porosidades, micro fisuras y macro fisuras en probeta curva. (b) Falta de fibras en probeta curva.

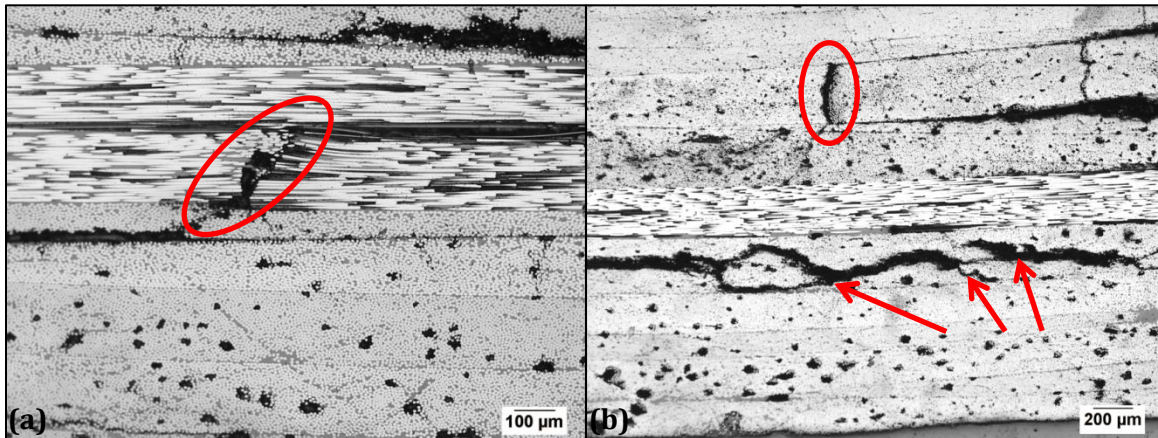


Figura 168: (a) Rotura de fibras en probeta curva. (b) Dislocación y avance del daño en probeta curva.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se estudiaron de forma mecánica y por medio del método de la EA diferentes laminados de CFRP cuyas variables principales fueron la secuencia de apilamiento (unidireccional o bidireccional) y el estado del material utilizado para su construcción (vencido o nuevo).

Los laminados unidireccionales fueron fabricados con 60 capas de pre impregnados con las fibras paralelas y orientadas en la misma dirección unas respecto a las otras, dando como resultado un espesor promedio de 3,6 mm. Por otra parte, los laminados bidireccionales tuvieron la misma cantidad de capas, pero con una secuencia de apilamiento de $[0^\circ/90^\circ]$, y el mismo espesor promedio. Ambos laminados fueron fabricados con el proceso de laminación manual con bolsa de vacío y curado en autoclave. El material vencido correspondió a pre impregnados fabricados en el año 2008 que habían perdido la cadena de frío por un tiempo indeterminado.

Se estudiaron además un laminado bidireccional más grande con fibras de vidrio entretejidas a las fibras de carbono y matriz de epoxi (en lugar de cianato éster como en los anteriores), y probetas curvas provenientes de una sección de tubo circular fabricada por filament winding, ambos materiales cedidos por una empresa que fabrica y comercializa productos con materiales compuestos.

Los resultados de los ensayos de flexión en tres puntos y de la EA en estos laminados, junto con su análisis y la comparación entre lotes, permitieron extraer las siguientes conclusiones, gracias a las cuales pudieron cumplirse el objetivo principal y los objetivos específicos:

- La velocidad del sonido en los CFRP estudiados es muy alta cuando se propaga en la dirección de las fibras (11424 m/s), mientras que en la dirección perpendicular a las mismas disminuye en un 83%. Los valores de atenuación estimados según las mediciones con rotura de minas (fuentes del tipo Hsu-Nilsen [81]) están en concordancia con la corrección de 1 a 1,3 dB por centímetro entre la fuente y los sensores que se menciona el trabajo de Brunner *et al.* [51], sin apreciarse, debido al tamaño reducido de las probetas, ningún otro efecto de la atenuación en estos estudios.
- El dispositivo de soporte utilizado para medir la EA no influye de manera significativa en los resultados mecánicos obtenidos, y por lo tanto puede ser implementado en este tipo de ensayos sin ninguna modificación.
- Desde el punto de vista mecánico, el comportamiento a la flexión entre las probetas de un mismo lote sigue los mismos patrones durante su carga, salvo que existan deslizamientos indeseados o muchas precargas.
- Los valores de resistencia máxima de las probetas unidireccionales con matriz de cianato éster están dentro de los valores esperados para probetas de CFRP en ensayos de flexión en tres puntos, basándose en los valores obtenidos por

Martínez-Jequier *et al.* [20] sobre probetas unidireccionales de dimensiones similares.

- Se encontró una diferencia del 18,3 % en la resistencia máxima promedio de probetas unidireccionales fabricadas bajo las mismas condiciones pero en diferentes fechas de loteo. La razón de esta disminución en el valor de la P_{max} podría deberse al estado específico del material que se utilizó en el momento de fabricación del laminado, y en menor medida a la dispersión propia de los diferentes lotes de producción de laminados que se fabrican para el proyecto aeroespacial en el que se utilizan. Esta diferencia sirvió para realizar comparaciones y obtener más conclusiones.
- La diferencia entre las cargas máximas de las probetas que se fabricaron con material vencido y las probetas análogas fabricadas con material nuevo fue de sólo 4,5 %, valor que se encuentra dentro de la propia dispersión de los dos lotes. De lo anterior se desprende que el material fabricado con pre impregnados vencidos podría continuar siendo útil en aplicaciones específicas y que es apto para realizar una recalificación de sus propiedades a fin de evaluar esta utilidad.
- Las probetas bidireccionales presentan menor resistencia máxima a la flexión que las probetas unidireccionales, debido a que las capas orientadas a 90° tienen las fibras orientadas en la dirección paralela a la carga y no aportan a la resistencia del laminado más allá de su matriz. Las probetas curvas tienen los valores más pequeños de P_{max} debido a que tienen la mayoría de las fibras orientadas a 45° y a que son más porosas.
- No se presentó una caída de carga con una tendencia suavizada en las probetas bidireccionales como ocurrió en los trabajos de Fotouhi *et al.* [14, 73]. Sólo en las probetas del lote KB (bidireccionales que contienen fibras de vidrio) la caída de carga tiende a ser más suavizada. Estas consideraciones podrían significar que la fibra de vidrio o la resina epoxi son responsables del comportamiento suavizado en la caída de carga de probetas con estos materiales, cuando se someten a ensayos de flexión en tres puntos.
- En todos los casos en los que se ensayaron probetas fabricadas con material vencido se observa un codo característico ubicado cerca de la primera subida de carga, entre 0,59 y 0,81 mm después de comenzar la misma. Debido a esto, y a las pruebas en las que se estudió la resistencia máxima de la resina, se concluyó que este codo característico es producido por la pérdida de resistencia de la misma y muy probablemente esté relacionado con el hecho de que el material se encontraba vencido, así como también que en el material vencido es la resina la parte que más se deteriora, mientras que las fibras siguen ofreciendo buenas propiedades al compuesto.
- Frente a las mismas condiciones de carga la tendencia acumulada de los hits se comporta de forma muy parecida entre las probetas. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por Paipetis *et al.* [40] en su trabajo realizado en probetas de CFRP bidireccionales.

- Siempre existe un cambio de pendiente abrupto en las tendencias acumuladas al presentarse la caída de carga que ocurre luego de alcanzarse la P_{max} , y, al momento de descarga, mientras más rápida sea la misma más abrupto será el cambio de pendiente.
- En las probetas de fibra de carbono y resina de cianato éster, la energía MARSE es el mejor indicador de los daños mayores y más relevantes, como el daño que se produce en la P_{max} , ya que este parámetro no es sensible a los daños menores, ni a la descarga de las probetas.
- La amplitud por el contrario mostró un comportamiento aleatorio en la región previa a la P_{max} , y hits muy juntos y agrupados en el tiempo en los momentos en los que se producen caídas de carga. Durante la carga estática, la EA continúa emitiendo hits de amplitudes intermedias por un tiempo indefinido, producto de posteriores daños y acomodamientos en el material, y durante la descarga los hits inician muy juntos y se distancian con el tiempo, hasta dejar de emitirse tras pasar la carga cero.
- Con el gráfico de la evolución de las cuentas individuales sin acumular es posible identificar los primeros picos significativos que aportan al crecimiento de las cuentas acumuladas e indican el comienzo de los daños menores en el material. Este análisis permitió identificar que existe un retraso en la aparición de los primeros daños menores en las probetas bidireccionales respecto a las unidireccionales, y que en las probetas del lote NUbr (baja resistencia) el comienzo de los daños menores ocurre antes que en el lote NUar (alta resistencia). Esto es acorde a la bibliografía estudiada [76, 77], indicando que a medida que la adhesión entre la matriz y el refuerzo se mejora, los eventos de EA aparecen más tardíamente.
- Se observó que existe un marcado retraso en la aparición de los primeros hits con amplitud mayor a 50 y 55 dB en las probetas bidireccionales respecto de las probetas unidireccionales. Esto podría indicar mayor consolidación entre capas en las probetas bidireccionales (lo que no implica que sean las más resistentes), y es un factor a tener en cuenta cuando se realizan ensayos de EA en este tipo de materiales compuestos. Además, también se observó que las probetas vencidas unidireccionales son las que presentaron mayor dispersión en la aparición de los distintos hits a lo largo de la carga, sobre todo en valores altos de amplitud y comparadas con las que no estaban vencidas, lo que puede estar relacionado a la utilización del material cuya cadena de frío fue interrumpida.
- El criterio para la detección del comienzo de los daños menores según las cuentas sin acumular es similar al criterio del primer hit con amplitud mayor o igual a 50 dB. Como en el comienzo de los ensayos es más probable encontrar hits con amplitudes elevadas acompañados por pocas cuentas, y estos podrían deberse a rozamientos y acomodamientos indeseados, se considera más acertado el criterio de las cuentas.
- En las probetas en las que se ensayó la resistencia a la flexión de la resina, se obtuvieron señales iniciales con contenidos de frecuencia en los rangos de 93-137

kHz, 214-257 kHz y 441-464 kHz, rangos que, debido a la naturaleza del ensayo, podrían relacionarse con el agrietamiento inicial de la matriz en las probetas de cianato éster.

- Existen similitudes entre las frecuencias obtenidas para las señales del lote NUbr (material nuevo unidireccional) y el lote VU (material vencido unidireccional), así como también entre las frecuencias del lote NB (material nuevo bidireccional) y VB (material vencido bidireccional). Esto indica que las probetas con una secuencia de apilamiento unidireccional se comportaron en frecuencia de la misma manera a pesar de ser de diferentes lotes, y que lo mismo se puede decir para las probetas bidireccionales. La principal diferencia entre los mecanismos de daño tempranos y tardíos en las probetas unidireccionales es que los primeros suelen presentar componentes frecuenciales más altos que por lo general no se aprecian relevantes en los mecanismos de daño tardíos (lo cual se mantiene acorde a la conclusión anterior). En las probetas bidireccionales, en cambio, los mecanismos de daño tardíos presentaron más seguido componentes en altas frecuencias. Esto podría ser atribuido al efecto Felicity, la rotura de nuevas capas de 90° al producirse los daños posteriores de las capas orientadas a 0°, o al hecho de que las capas de 90° interiores podrían tener componentes frecuenciales distintos a los de las capas de 90° superficiales, como indica la literatura para pruebas de tracción [19,74].
- Los análisis por medio de Wavelets confirmaron los rangos de frecuencia obtenidos usando la FFT y demostraron que la mayor parte del espectro se encuentra en los primeros 600 μ s de la señal, sin contenidos significativos por encima de 350 kHz pasado este tiempo.
- Las pruebas en las que se detuvo la flexión antes de alcanzar la P_{max} permitieron estudiar y comprender el progreso del daño en las probetas con matriz de cianato éster, revelando que los primeros daños son micro roturas de fibras en las probetas unidireccionales, y también delaminaciones menores en las probetas bidireccionales, confirmados por las micrografías (en las probetas unidireccionales no se observaron estas delaminaciones). Estos daños primero aparecen en la parte central de las probetas (zona de carga) o en la línea de los puntos de apoyo, y a medida que la carga avanza, la grieta central se propaga, ensanchándose y uniéndose con las delaminaciones, que a su vez se extienden hacia los costados y separan cada vez más fragmentos del material, produciendo quiebres o escalonando a las fibras, como se observó en las probetas más exigidas. La EA detecta estos daños menores, y en el caso de la micro rotura de fibras previa a la falla irreversible que ocurre en la P_{max} , un evento con 1028 cuentas y detectado por la energía en una de las probetas unidireccionales resultó ser clave para estas conclusiones, siendo un claro ejemplo del último daño en las probetas que en pocas fracciones de segundo y de manera casi inmediata puede convertirse en el daño mayor e irreversible que comienza luego.
- El análisis FFT de este hit con 1028 cuentas y 103 dB, correspondiente a la micro rotura de fibras observada en las micrografías de la probeta VU7 (unidireccional

con material vencido), arrojó componentes frecuenciales importantes centrados en 92; 103; 130; 155; 176 y 251 kHz, aunque el hit inmediatamente anterior (de 583 cuentas y 88 dB) captado por el otro canal (en teoría más cercano al sensor) mostró características generales distintas, con excitaciones de frecuencia que llegaron a abarcar la banda de 394 a 518 kHz. Esto indica que para un mismo mecanismo de daño supuesto las señales pueden llegar a tener comportamientos frecuenciales inesperados debido a factores particulares como el comportamiento del daño a través del espesor [19,74], o la presencia y superposición de varios mecanismos, por mencionar algunos.

- Las imágenes y micrografías revelaron, a nivel macro o micro, grietas longitudinales y transversales, deformaciones inelásticas, compresiones, tensiones, agrietamiento de la matriz, delaminaciones, rotura y escalonamiento de fibras, falta de fibras y porosidades. Las imágenes con microscopio óptico permitieron determinar el porcentaje de fibra y resina entre las distintas probetas de todos los lotes ensayados, y ayudaron a entender el progreso del daño, es decir, la forma en la que comienza y se propaga el daño en este tipo de materiales compuestos.
- El hecho de que en las probetas unidireccionales no se observara agrietamiento de la matriz y sí se apreciara en las probetas bidireccionales puede estar relacionado a que según los resultados de Fotouhi *et al.* [73] el mecanismo de fractura dominante en las muestras unidireccionales es la rotura de fibras, mientras que en las muestras bidireccionales es el agrietamiento de la matriz.
- A pesar de que la EA sí detectó eventos correspondientes a la iniciación de los daños menores en las probetas, no se observaron daños en algunas de las probetas ensayadas hasta antes de alcanzar su resistencia máxima, y en el resto sólo se observaron micro rotura de fibras y delaminaciones menores (el agrietamiento de la matriz sólo fue observado en probetas bidireccionales que ya habían superado su P_{max}). Esto sugiere que los mismos son despreciables y no tienen un tamaño importante observable con estos aumentos, o bien que los daños se cierran al relajar la carga (por ejemplo procesos de cierre de fisuras [79]), como podría ocurrir con las delaminaciones menores. De cualquier manera, apoyándose también en los resultados mecánicos y en la bibliografía [18], se concluye que estos daños no representan ningún riesgo para la salud estructural del material, cuando se lo somete a un proceso de flexión que induce una carga por debajo de su resistencia máxima a esta alteración.

REFERENCIAS

- [1] S. K. Mazumdar, "Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering", Composite Materials, CRC Press, 2002.
- [2] W. H. Prosser, "The Propagation Characteristics of the Plate Modes of Acoustic Emission Waves in Thin Aluminum Plates and Thin Graphite/Epoxy Composite Plates and Tubes", NASA Technical Memorandum 104187, Baltimore, Maryland, 1991.
- [3] C. Grosse, M. Ohtsu, "Acoustic Emission Testing, Basics for Research Applications in Civil Engineering", Springer, Berlin, 2008.
- [4] K. Ono, A. Gallego, "Research and Applications of AE on Advanced Composites", Journal of Acoustic Emission, Vol. 30, 2012, 180–229.
- [5] T. Loutas, N. Eleftheroglou, D. Zarouchas, "A data-driven probabilistic framework towards the in-situ prognostics of fatigue life of composites based on acoustic emission data", Composite Structures 161, 2016, 522–529.
- [6] V. Muñoz, B. Vales, M. Perrin, M.L. Pastor, H. Welemane, A. Cantarel, M. Karama, "Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography", Composites Part B 85, 2015, 68–75.
- [7] X. Jia, J. Zhu, W. Li, X. Chen, X. Yang, "Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes", Composites Science and Technology 110, 2014, 35–44.
- [8] S. W. Case, K. L. Reifsnider. "Fatigue of composite materials". Comprehensive Structural Integrity, Vol. 4, 2003, 405–42.
- [9] R. H. Sampieri, C. Fernández-Collado, P.B Lucio, "Metodología de la investigación. Quinta edición", México D. F., 2010, 76–89.
- [10] R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials. Second Edition", Taylor & Francis, 1998.
- [11] S. T. Peters, "Handbook of Composites. Second Edition", Chapman & Hall, 1998.
- [12] F.Y. Hshieh, H. D. Beeson, "Flamability Testing of Flame-Retarded Epoxy Composites and Phenolic Composites", Fire Mater, 21, 1997, 41–49.
- [13] A. Bussiba, M. Kupiec, S. Ifergane, R. Piat, T. Bohlke, "Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique", Composites Science and Technology 68, 2007, 1144–1155.
- [14] M. Fotouhi, F. Pashmforoush, M. Ahmadi, A. Refahi Oskouei, "Monitoring the initiation and growth of delamination in composite materials using acoustic emission under quasi-static three-point bending test", Journal of Reinforced Plastics & Composites, 30(17), 2011, 1481–1493.

- [15] S. A. Carey, "Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Signature Analysis of Failure Mechanisms in Carbon Fiber reinforced Polymer Materials", Thesis, University of South Carolina, 2008.
- [16] E. Rodríguez, "Desarrollo de Materiales Compuestos Avanzados Basados en Fibras de Carbono Para la Industria Aeroespacial", Anales Académicos Nacionales de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tomo 64, 2012, 1-6.
- [17] J. M. Hodgkinson, "Mechanical testing of advanced fibre composites", CRC Press, Cambridge, England, 2000.
- [18] E. J. Barbero, "Introduction to Composite Materials Design. Second Edition", CRC Press, 2011.
- [19] E. Maillet, C. Baker, G. N. Morscher, V. V. Pujar, J. R. Lemanski, "Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission", Composites: Part A 75, 2014, 77-83.
- [20] J. Martínez-Jequier, A. Gallego, E. Suárez, F. J. Juanes, Á. Valea, "Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis", Composites: Part B 68, 2014, 317-326.
- [21] P.K. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. Third Edition", CRC Press, 2007.
- [22] S. van der Heijden, L. Daelemans, K. De Bruycker, R. Simal, I. De Baere, W. Van Paepegem, H. Rahier, K. De Clerck, "Novel composite materials with tunable delamination resistance using functionalizable electrospun SBS fibers", Composite Structures 159, 2016, 12-20.
- [23] R. Prakash, V. Krishnaraj, R. Zitoune, J. Sheikh-Ahmad, "High-Speed Edge Trimming of CFRP and Online Monitoring of Performance of Router Tools Using Acoustic Emission", Materials, 9, 2016, 798.
- [24] J. Niesse, H. Ahluwalia, "A Practical Guide to Field Inspection of FRP Equipment and Piping", Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Inc., MTI Project, St. Louis, 2001, 129-199.
- [25] S. J. See, S. H. Han, K. U. Jeong, I. J. Bae, I. P. Hong, S. K. Choi, S. S. Kim, "Effect of crystal morphology transition of polypropylene on interfacial properties of carbon fiber-reinforced composites through AlOOH surface treatment", Composites: Part A 78, 2015, 362-370.
- [26] W. Zhou, "Electrical Resistance and Acoustic Emission Measurements for Monitoring the Structural Behavior of CFRP Laminate", Thesis, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015.
- [27] X. Martinez, S. Oller, E. Barbero, "Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo", Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 2011, 27(3): 189-199.

- [28] C. A. Rodríguez Vázquez, "Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras", Tesis, San Nicolás de Garza, Nuevo León, 2013.
- [29] M. Bourchak, I.R.Farrow, I.P.Bond, C.W. RowlandI. "Acoustic Emission Study of damage Accumulation in CFRP Composites Under Block Loading", 11th European Conference on Composite Materials, Rhodes, Greece, 2004, Paper B014.
- [30] M. Fotouhi, M. A. Najafabadi, "Acoustic emission-based study to characterize the initiation of delamination in composite materials", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2016, Vol. 29(4), 519–537.
- [31] W. D. Callister, Jr., "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Editorial Reverté, 1995.
- [32] Norma ASTM E 1316-18, "Standard Terminology for Nondestructive Examinations", 2018.
- [33] T. Fu, Y. Liu, Q. Li, J. Leng, "Fiber optic acoustic emission sensor and its applications in the structural health monitoring of CFRP materials", *Optics and Lasers in Engineering* 47, 2009, 1056–1062.
- [34] NDT Resource Center. Online. (Revisado en febrero de 2018): https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_History.htm.
- [35] J. Kaiser, "Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch", Doktor-arbeit, 1950.
- [36] A. G. Beattie, "Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques", Sandia Report, 2013, SAND2013-7779.
- [37] B. Muravin, "Acoustic Emission Science and Technology", *Journal of Building and Infrastructure Engineering of the Israeli Association of Engineers and Architects*, 2009.
- [38] R. L. Mehan, J. V. Mullin, "Analysis of composite failure mechanisms using acoustic emissions", *Journal of Composite Materials*, 5, 1971, 266–9.
- [39] R. W. Stephens, A. A. Pollock, "Waveforms and frequency spectra of acoustic emissions", *Journal of Acoustic Society of America*, 50 (3 pt 2), 1971, 904–10.
- [40] A.S. Paipetis, D.G. Aggelis, "Damage Assessment in Fibrous Composites Using Acoustic Emission", Chapter 13 of the book "Acoustic Emission", Edited by Wojciech Sikorski, InTech, Open Access, 2012.
- [41] I. Grabec, "Relation between development of defects in materials and acoustic", *Ultrasonics*, 1980, 9–12.
- [42] D. M. Egle, "A stochastic model for transient acoustic emission signals", *Journal of Acoustic Society of America*, 65, 1979, 1198–1203.

- [43] M. P. Gómez, “Fundamentos de la Emisión Acústica”, Curso de Especialización en Ensayos no Destructivos, UNSAM-CNEA, 2015.
- [44] T. J. Fowler, “Acoustic Emission Testing of Fiber Reinforced Plastics”, Preprint 3092, Fall Convention, San Francisco, CA. New York: American Society of Civil Engineers, 1977.
- [45] A. L. Almkvist, “Acoustic emission methods in fatigue testing”, Thesis MMK 2015:8 MKN 127, KTH Industrial Engineering and Management, Machine Design, Stockholm, 2015.
- [46] N. Ativitavas, “Acoustic Emission Signature Analysis of Failure Mechanisms in Fiber Reinforced Plastic Structures”, Ph.D. Diss., The University of Texas at Austin, 2002.
- [47] K. Ono, “Acoustic Emission in materials research – a review”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 29, 2011.
- [48] M. Kalicka, “Acoustic Emission as a monitoring method in prestressed concrete bridges health condition”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 27, 2009.
- [49] V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Sarychev V. Schavelin, “Friction of solids and nature of acoustic emission”. Chapter 1, Tribology and Interface Engineering Series, 2007, 1–36.
- [50] R. Austin, D. Forsytha, J. Yu, M. ElBatanouny, P. Ziehl, “Damage Evaluation for High Temperature CFRP Components Using Acoustic Emission Monitoring”, 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conference Proceedings 1581, 2014, 501–505.
- [51] A.J. Brunner, M. Barbezat, “Acoustic Emission Monitoring of Delamination Growth in Fibre-Reinforced Polymer-Matrix Composites”, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, CH-8600 Dübendorf, Switzerland, 2006.
- [52] R. Unnthorsson, T. P. Runarsson, M. T. Jonsson, “Acoustic emission based fatigue failure criterion for CFRP”, International Journal of Fatigue 30, 2007, 11–20.
- [53] P. Nimdum, J. Renard, “Use of Acoustic Emission to Discriminate Damage Modes in Composite-Antenna-Structure During Buckling Loading”, 15th International Conference on Experimental Mechanics, 2012, Paper Ref: 2778.
- [54] C. J. Hellier, “Chapter 10: Acoustic Emission Testing”, Handbook of Nondestructive Evaluation, McGraw-Hill Companies, 2003.
- [55] K. Asamene, L. Hudson, M. Sundaresan, “Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels”, Ultrasonics 59, 2015, 86–93.
- [56] W. H. Prosser, “Advanced AE Techniques in Composite Materials Research”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 14 (3-4), 1996, S1–S11.

- [57] Q. Wu, F. Yu, Y. Okabe, S. Kobayashi, "Application of a novel optical fiber sensor to detection of acoustic emissions by various damages in CFRP laminates", *Smart Materials and Structures*, 24, 2014, 015011 (10pp).
- [58] K. Ono, R. Landy, C. Ouchi, "On the Amplitude Distribution of burst Emission due to MnS Inclusions in HSLA Steels", *Proceedings The Fourth AE Symposium*, High Pressure Institute of Japan, Tokyo, 1978, 4-33/4-45.
- [59] D. E. Stone, P.F. Dingwall, "Acoustic emission parameters and their interpretation", *NDT International*, 10, 1977, 51-62.
- [60] R. B. Clough, "The energetics of Acoustic Emission Source Characterization", *Materials Evaluation*, 45, 1987, 556-563.
- [61] A. A. Pollock, "Acoustic emission inspection", PAC 1-14, PAC internal report, TR 103-96-12/89, 2003, 29-40.
- [62] PAC, "PCI-2 Based AE system User Manual Rev. 2", Physical Acoustic Corporation, Princeton, NJ, 2004.
- [63] A. A. Pollock, "Setup for Acoustic Emission Testing", *Materials Evaluation*, Vol. 75, No. 5, 2017.
- [64] Norma ASTM D 2344-00, "Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates", 2000.
- [65] Norma ASTM D 7264-06, "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials", 2006.
- [66] Norma ASTM D 6272, "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending", 2002.
- [67] Norma ASTM D 790-03, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", 2003.
- [68] Norma ISO 14125:1998(E), "Fibre-reinforced plastic composites. Determination of flexural properties", 1998.
- [69] X. L. Gong, A. Laksimi, M. L. Benzeghagh, "Nouvelle approach de l'émission acoustique et son application à l'identification des mécanismes d'endommagement dans les matériaux composite", *Revue des composites et des matériaux avancés*, Vol. 8(1), 1998, 179-205.
- [70] P. J. De Groot, P. A. Wijnen, R. B. Janssen, "Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 55, 1995, 405-412.
- [71] M. Burchak, I. R. Farrow, I. P. Bond, C. W. Rowland, F. Menan, "Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites", *International Journal of Fatigue* 29, 2006, 457-470.

- [72] M. Assarar, M. Bentahar, A. El Mahi, R. El Guerjouma, "Monitoring of damage mechanisms in sandwich composite materials using acoustic emission", *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 24(6), 2015, 787–804.
- [73] M. Fotouhi, H. Heidar y, M. Ahmadi, F. Pashmforoush, "Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet and fuzzy C-means clustering", *Journal of Composite Materials*, 46(15), 2012, 1795–1808.
- [74] C. Baker, G. N. Morscher, V. V. Pujar, J. R. Lemanski, "Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis", *Composites Science and Technology* 116, 2015, 26–32.
- [75] S. Giancane, F. W. Panella, R. Nobile, V. Dattoma, "Fatigue damage evolution of fiber reinforced composites with digital image correlation analysis", *Procedia Engineering* 2(1), 2010, 1307–15.
- [76] A. Izer, A. Stocchi, T. Bárány, V. Pettarin, C. Bernal, T. Czigány, "Effect of the Consolidation Degree on the Fracture and Failure Behavior of Self-Reinforced Polypropylene Composites as Assessed by Acoustic Emission", *Polymer Engineering and Science*, 2010.
- [77] M. C. Lucchetta, M. Mollo, C. Bernal, "Estudio de la fractura y falla de compuestos auto-reforzados por emisión acústica", 13^{er} Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales, SAM-CONAMET, 2013.
- [78] E. Maillet, G. N. Morscher, "Waveform-based selection of acoustic emission events generated by damage in composite materials", *Mechanical Systems and Signal Processing* 52-53, 2014, 217–227.
- [79] D. Gagar, P. Foote, P. E. Irving, "Effects of loading and sample geometry on acoustic emission generation during fatigue crack growth: Implications for structural health monitoring", *International Journal of Fatigue* 81, 2015, 117–127.
- [80] F. Yu, Y. Okabe, Q. Wu, N. Shigeta, "A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor", *Composites Science and Technology* 135, 2016, 116–122
- [81] N. N. Hsu, F. R. Breckenridge, "Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors", *Materials Evaluation* 39, 1981, 60–68.
- [82] N. Alver, H. M. Tanarlan, Ö. Y. Sülün, E. Ercan, M. Karcılı, E. Selman, K. Ohno, "Effect of CFRP-spacing on fracture mechanism of CFRP-strengthened reinforced concrete beam identified by AE-SiGMA", *Construction and Building Materials* 67, 2014, 146–156.
- [83] E. Selman, A. Ghiami, N. Alver, "Study of fracture evolution in FRP-strengthened reinforced concrete beam under cyclic load by acoustic emission technique: An

integrated mechanical-acoustic energy approach”, *Construction and Building Materials* 95, 2015, 832–841.

[84] A. Ali, J. Abdalla, R. Hawileha, K. Galal, “CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure”, *Eighth International Conference on Material Sciences (CSM8-ISM5)*, *Physics Procedia* 55, 2014, 10–16.

[85] W. Choi, H. Yun, “Acoustic emission activity of CFRP-strengthened reinforced concrete beams after freeze–thaw cycling”, *Cold Regions Science and Technology* 110, 2014, 47–58.

[86] D. Li, Z. Chen, Q. Feng, Y. Wang, “Damage analysis of CFRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns by acoustic emission techniques”, *Smart Materials and Structures*, 24, 2015, 085017 (11pp).

[87] M. M. Jalili, S. Y. Mousavi, A. S. Pirayeshfar, “Investigating the Acoustical Properties of Carbon Fiber-, Glass Fiber-, and Hemp Fiber-Reinforced Polyester Composites”, *Polymer Composites*, 35, 2014, 2103–2111.

ANEXO I: ENSAYOS SOBRE PANELES SÁNDWICH

Se describen los ensayos de corte realizados sobre 10 piezas Stand off de 35 mm de altura de material G10 utilizadas para la sujeción de cables destinadas al harness de una antena satelital adheridos a probetas de panel Sándwich (fibra de carbono con núcleo de aluminio). Se utilizaron criterios obtenidos de la norma ECSS-E-HB-32-22A para la puesta a punto del ensayo no normalizado.

Se requería determinar la carga de falla a corte de la pieza Stand-off adherida a una muestra de panel estructural representativo de los paneles de una antena satelital. Se sometió a los Stand off a cargas de corte, simulando las condiciones de fijación en los paneles de la antena hasta lograr la falla de los mismos.

Las dimensiones de los paneles sándwich fueron de 10 x 10 cm. En dichos paneles se encontraban adheridos los Stand off sujetos al sustrato con un adhesivo Scotchweld 2216 B/A Gray.

Se solicitaron un total de 10 probetas del panel estructural con el Stand off pegado en el centro, identificadas con letras sucesivas A, B C, D... como se muestra en la figura 1:

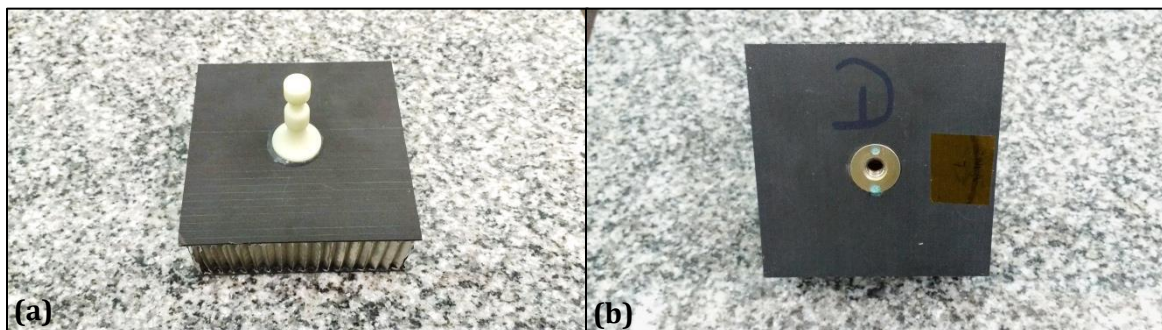


Figura 1: Probetas de paneles sándwich con Stand off pegado. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

Cinco de estas probetas fueron fabricadas en Argentina (probetas A a la E) y cinco en España (probetas F a la J).

Las placas de material compuesto que conforman a las probetas consisten en 12 capas apiladas a 0, 45 y 90° alternadas a lo largo de su espesor.

El esfuerzo de corte se generó con una máquina de tracción universal a través de una fuerza transversal a la sección del Stand off ubicada en la garganta que el mismo posee cerca del extremo libre, donde en condiciones de uso normal se colocan dos precintos que sostienen las líneas de cableado (Figura 2).

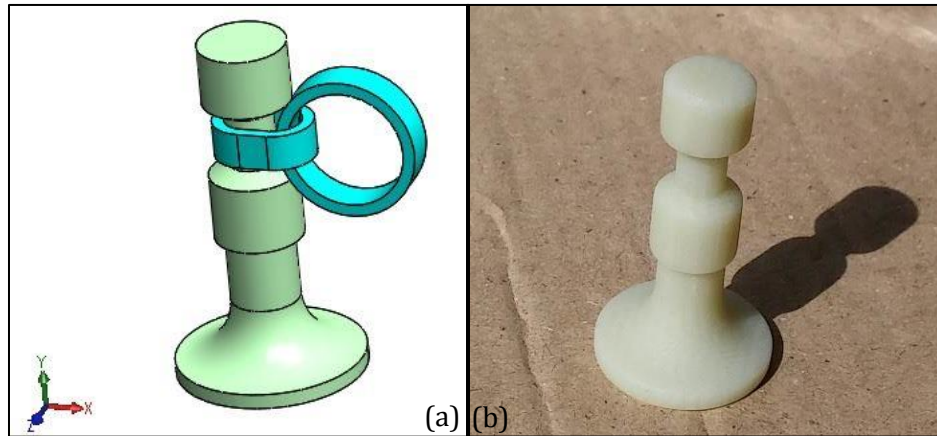


Figura 2: (a) Esquema del Stand off con dos precintos. (b) Fotografía de un Stand off.

Debido a que los precintos que se pretendían utilizar se rompían antes de separarse el Stand off, se utilizó una pieza metálica para realizar la fuerza en lugar de los precintos.

Las probetas fueron colocadas en el dispositivo que se observa en la Figura 3 y sujetas a la máquina de tracción según se observa en la Figura 4, colocando también los sensores de EA sujetos con cinta aisladora.

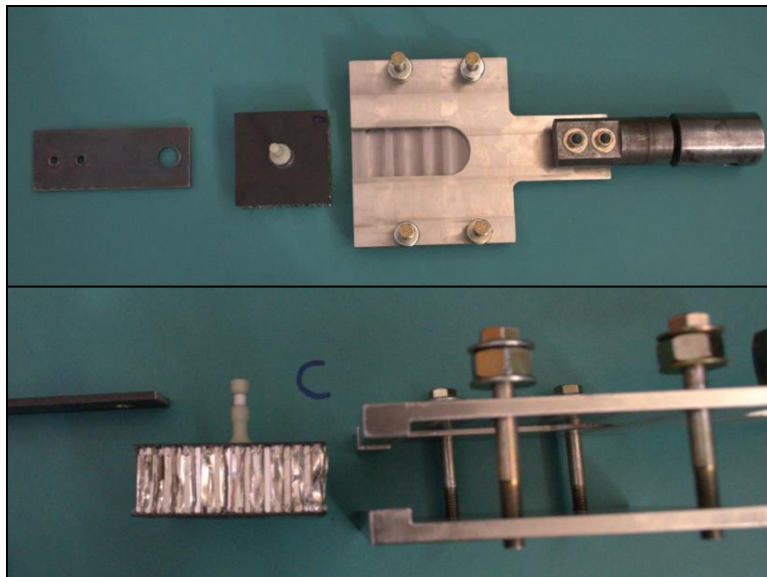


Figura 3: Dispositivo utilizado para realizar los ensayos de flexión de los Stand off.

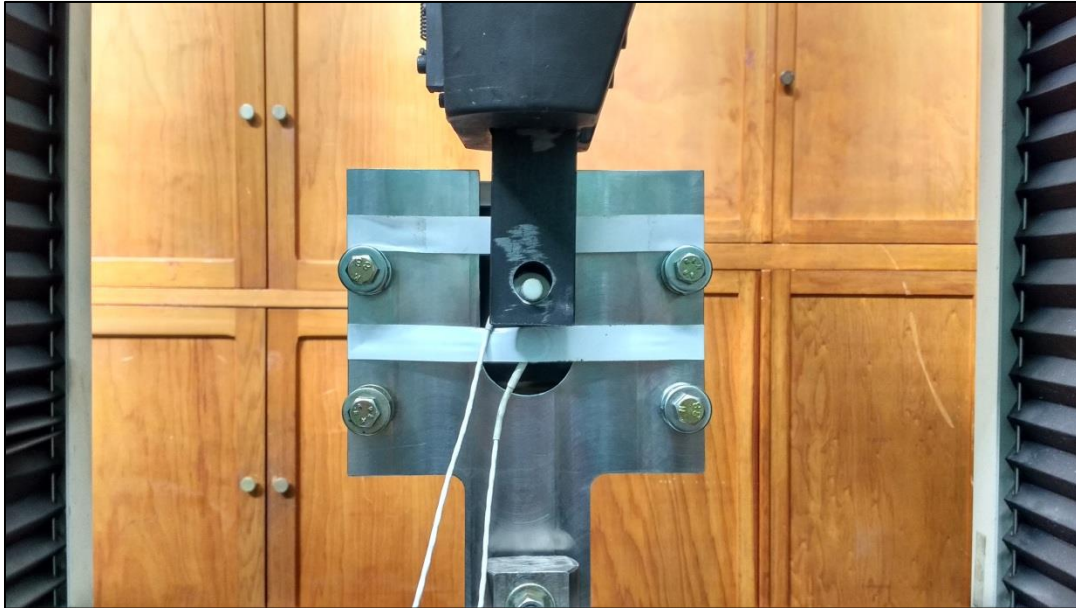


Figura 4: Disposición de la probeta durante el ensayo de corte con EA.

Una vez iniciado el ensayo se continuó incrementando la carga a una velocidad de 1 mm/min hasta que el conjunto fallara, despegándose el Stand off del panel con o sin arrancamiento de fibras.

Los resultados de las cargas máximas obtenidas se presentan en la tabla I:

Tabla I: Resultados mecánicos de los ensayos sobre paneles sándwich.

Probeta	P_{\max} (N)
A	342,5
B	374,0
C	388,0
D	461,5
E	404,0
F	357,5
G	336,0
H	274,5
I	318,5
J	348,5
Promedio	360,5

A continuación se presentan las curvas de carga en función del desplazamiento del cabezal:

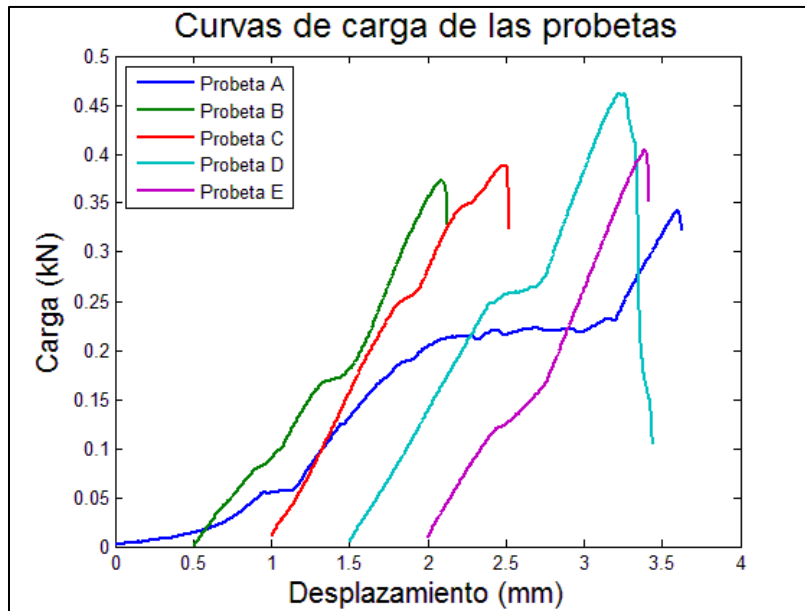


Figura 5: Curvas de carga vs desplazamiento de las probetas (probetas de la CNEA).

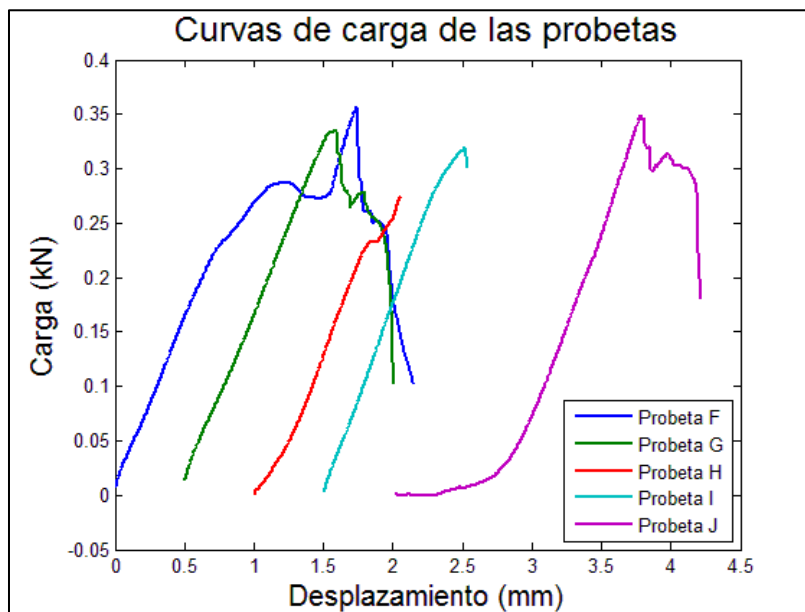


Figura 6: Curvas de carga vs desplazamiento de las probetas (probetas España).

En la mayoría de las probetas el modo de falla resultó ser el desprendimiento del pegamento separándose el Stand off de la placa de CFRP. Sólo en las probetas B y J se observó arrancamiento de fibras en la placa de CFRP (Figura 7).

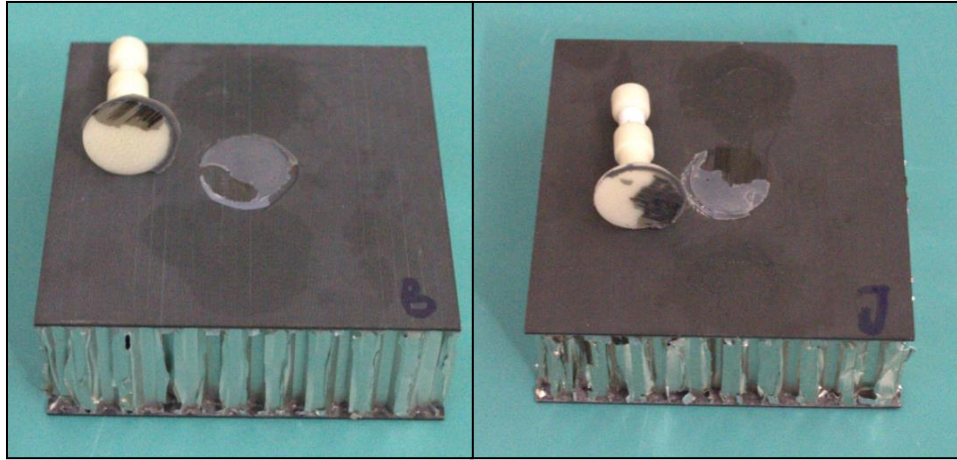


Figura 7: Probetas con arrancamiento de fibras luego de ser ensayadas.

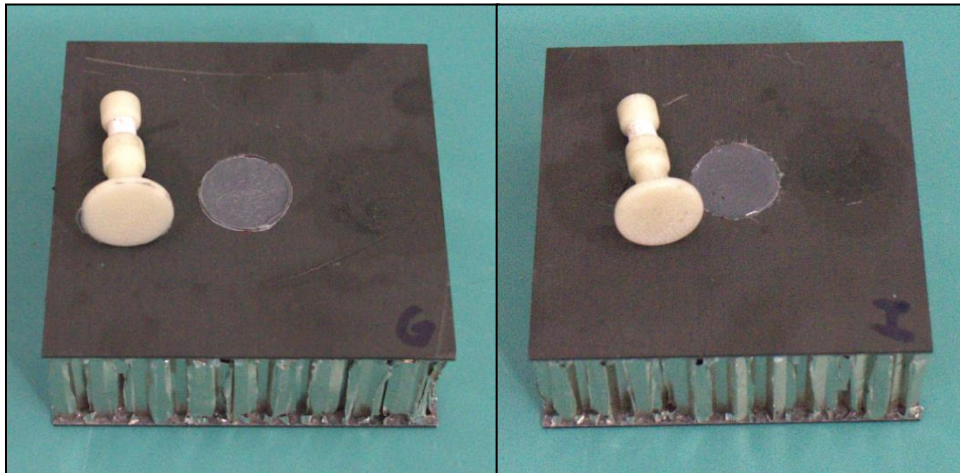


Figura 8: Probetas sin arrancamiento de fibras luego de ser ensayadas.

Los gráficos de la carga y la actividad de EA en función del tiempo de las probetas de este lote no siguieron tendencias comunes definidas (Figura 9), al igual que las curvas de carga en función del desplazamiento ya presentadas.

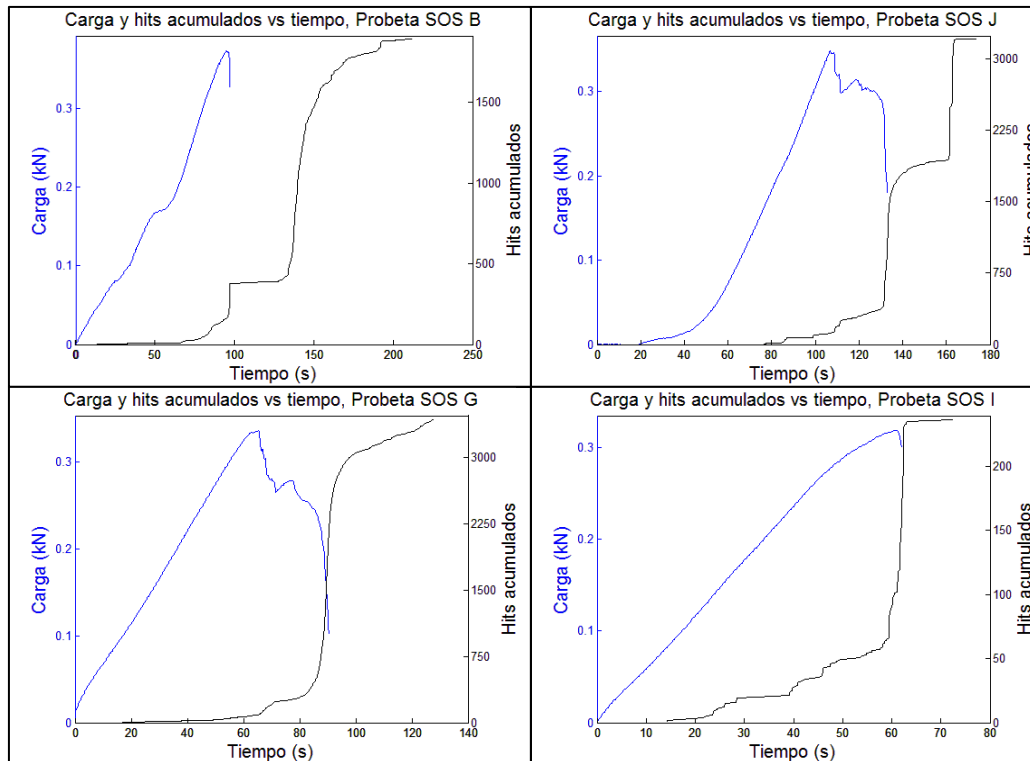


Figura 9: Carga y actividad de EA en función del tiempo de los ensayos sobre paneles sándwich.

La denominación “SOS” en estas probetas corresponde a “Stand Off en paneles Sándwich”. Los eventos registrados luego de la carga máxima (que es el momento en el cual el Stand off se desprende del laminado, con o sin arrancamiento de fibras y de manera rápida o deslizante) corresponden en su mayoría a rozamientos del Stand off con el sistema de sujeción del ensayo, y en pocos casos podrían deberse a despegues posteriores, como sucede en la probeta J (evento sobresaliente que dispara la actividad y las cuentas alrededor de los 160 s).

Las cuentas acumuladas se comportaron muy similar a la actividad de EA (Figura 10), y su evolución a lo largo del tiempo indicó eventos que no superan las 300 cuentas a lo largo de la carga hasta producirse los eventos del despegue (figura 11). Estos eventos incluyen las emisiones acústicas del cuerpo de aluminio del panel sándwich.

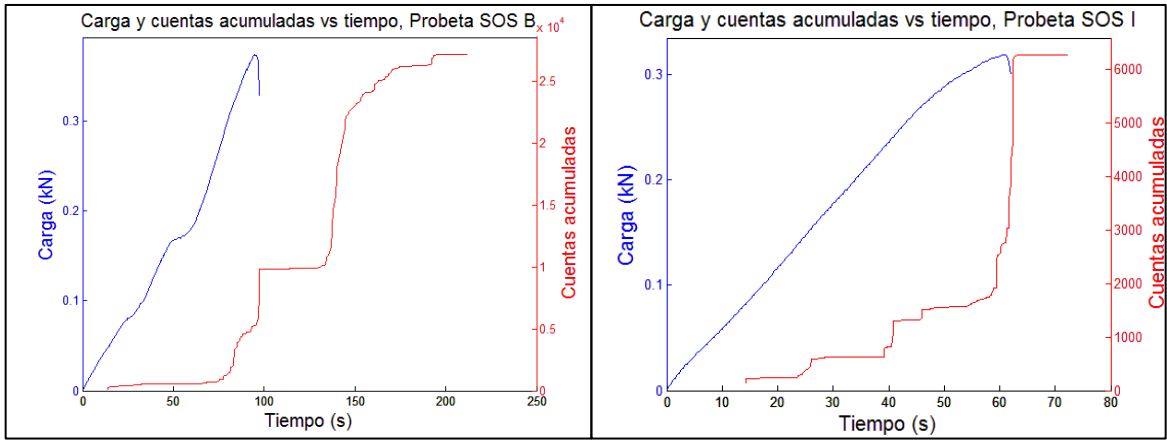


Figura 10: Evolución de las cuentas acumuladas en probetas de los ensayos sobre paneles sándwich.

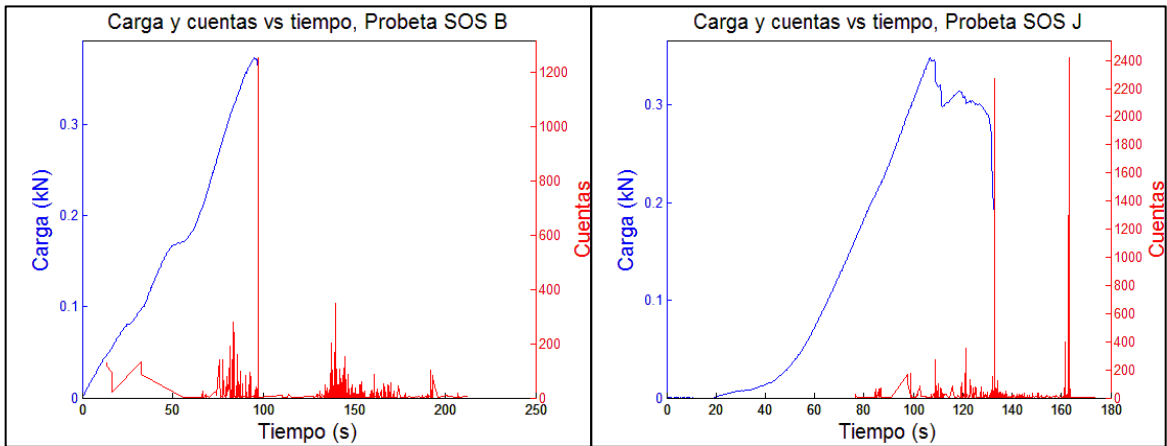


Figura 11: Evolución de las cuentas sin acumular en probetas de los ensayos sobre paneles sándwich.

Por medio de la energía MARSE acumulada se detectaron eventos previos de distinto nivel reflejados como escalones de diferentes alturas a lo largo de la curva de carga, y al momento del despegue principal del Stand off un mayor incremento de la misma (Figura 12).

La amplitud por su parte mostró eventos con valores mayores a 60 dB desde etapas tempranas y acumulación de hits acorde a los otros parámetros (Figura 13).

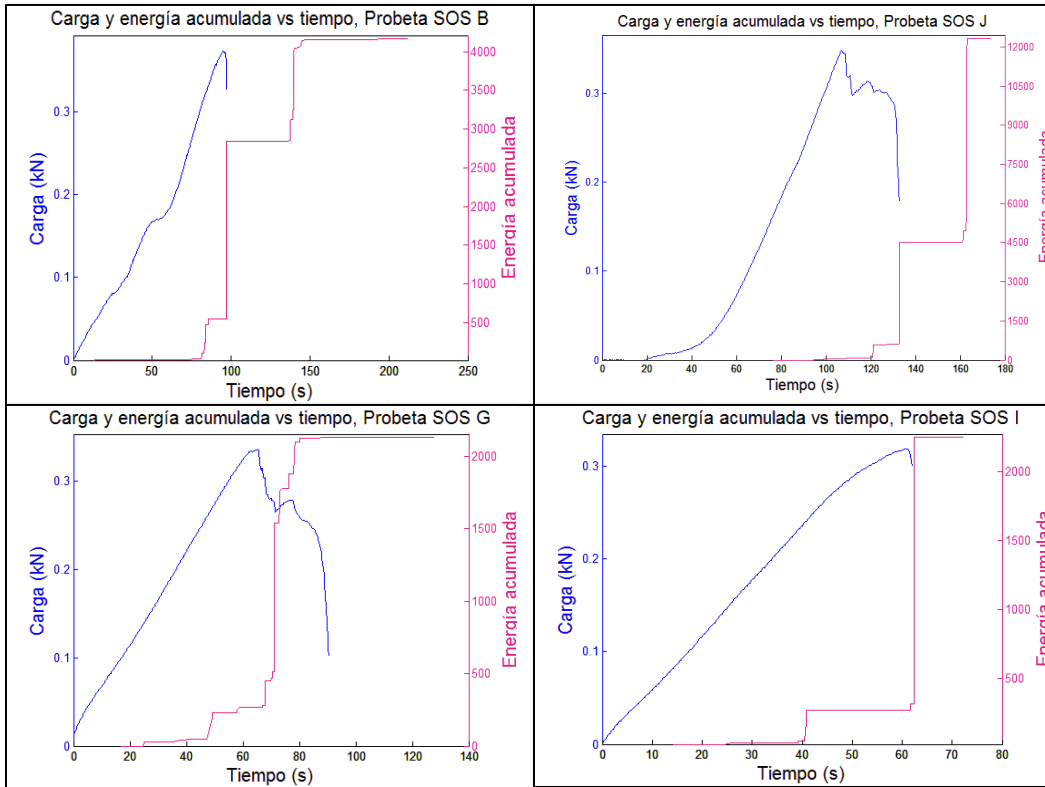


Figura 12: Energía acumulada (cuentas) en probetas de los ensayos sobre paneles sándwich.

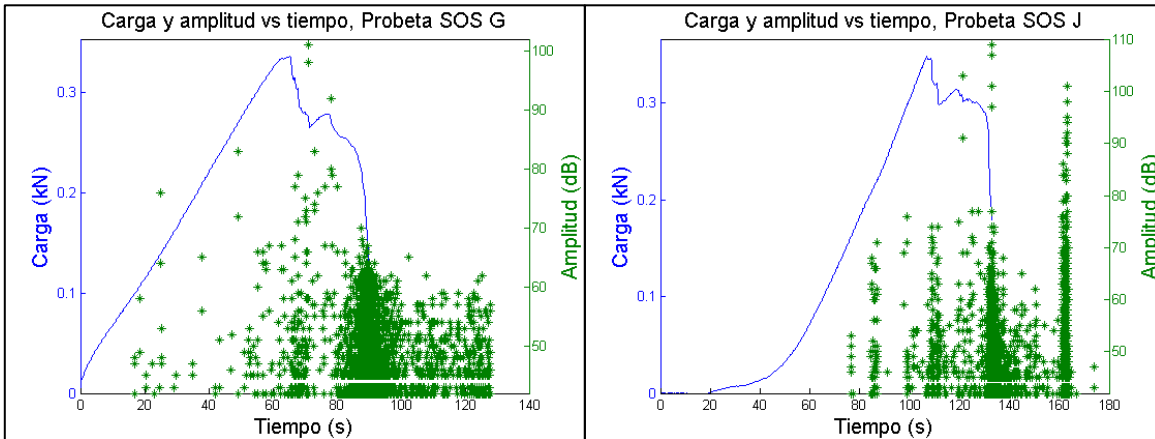


Figura 13: Amplitud de los hits en probetas de los ensayos sobre paneles sándwich.

Tanto en los resultados mecánicos como de EA no se encontraron diferencias significativas entre las probetas fabricadas en Argentina y las probetas fabricadas en España, excepto por la resistencia mecánica que es apenas superior en las primeras.

Queda como trabajo a futuro analizar de forma particular por medio de FFT y Wavelets los distintos hits registrados en cada etapa del ensayo así como mayores análisis estadísticos de los datos.