

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS Y DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL PARA LA
EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE UN RIEL DE FIJADOR EXTERNO FABRICADO EN FIBRA DE
CARBONO**

OSCAR EDUARDO GONZALEZ ACOSTA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI



2018

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS Y DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL PARA LA
EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE UN RIEL DE FIJADOR EXTERNO FABRICADO EN FIBRA DE
CARBONO**

OSCAR EDUARDO GONZALEZ ACOSTA

Anteproyecto para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA
Con énfasis en
PROFUNDIZACIÓN

Director:

ING. JOAO LUIS EALO CUELLO, Ph.D.

Codirector:

ING. Gonzalo Fernando Casanova Garcia, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI



2018

X _____

JOAO LUIS EALO CUELLO

Director

X _____

Jurado Evaluador 1

X _____

Jurado Evaluador 2

Agradecimientos

Agradecimiento principal a Dios porque sin Él nada de esto hubiera sido posible

A mis padres y mis hermanos quienes siempre han estado pendientes de mi evolución y apoyándome en cada instante de mi vida.

A mis amigos y compañeros del LAVA y del GIMI, quienes me ayudaron y enseñaron cada día que compartí con ellos.

RESUMEN

El uso de materiales fibrorreforzados ha ido adquiriendo una mayor participación en la construcción de componentes mecánicos y estructurales debido a sus buenas propiedades mecánicas. Este tipo de materiales se ha convertido en foco de investigación en diferentes aplicaciones, como por ejemplo en biomedicina para la fabricación de fijadores externos para el tratamiento de fracturas y transporte óseo. Por sus prestaciones semejantes a las de los materiales metálicos, estos dispositivos fabricados con piezas en fibra de carbono resultan ser más livianos y de mayor translucidez ante los rayos X.

Debido al procedimiento de fabricación de rieles para fijadores externos en material fibrorreforzado con fibra de carbono, el cual es artesanal, se vuelven vulnerables a la aparición de defectos o elementos extraños en su interior, lo que termina por modificar las propiedades mecánicas del elemento final. Como respuesta a esta dificultad, en este trabajo se define un método que permite evaluar los rieles construidos con fibra de carbono empleando los ensayos no destructivos como un procedimiento de control de calidad final.

En la primera parte de este documento se pueden encontrar los resultados experimentales de pruebas de ultrasonido con transductores acoplados en aire incidiendo de manera normal, realizadas en rieles construidos con fibra de carbono, donde se permite ver la capacidad que tiene la técnica para identificar la zona donde se encuentra el daño y el tamaño del daño.

En la segunda parte se observan los resultados experimentales de análisis modal realizado a elementos construidos con fibra de carbono, donde se encontró que las propiedades modales cambian con la existencia de un daño al interior del elemento. Esta técnica permite evaluar de manera general un elemento para verificar si tiene daños, no obstante, lo aquí implementado no permite identificar con precisión la posición ni el tamaño del defecto.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que es posible detectar daños al interior de rieles construidos con fibra de carbono. El procedimiento general para la detección de los daños es una combinación de las dos técnicas, donde el análisis modal permite la evaluación general y el ensayo de ultrasonido el análisis particular y la detección de la zona del daño.

Palabras clave: Fijación externa; Detección de fallas; Fibra de carbono; Ultrasonido; Transmisión; Análisis Modal.

Contenido

RESUMEN	iii
LISTADO DE TABLAS	viii
LISTADO DE FIGURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. Marco teórico.....	5
3.1. Introducción	5
3.2. Daños más comunes en fibra de carbono.....	5
3.3. Ensayos no destructivos.....	6
3.3.1. Inspección por Ultrasonido.	6
3.3.1.1. Pulso-Eco	6
3.3.1.2. Prueba de transmisión.	6
3.3.2. Fenómeno de transmisión en incidencia normal.....	6
3.3.3. Prueba de resonancia.....	9
3.3.4. Análisis modal.	10
3.4. Vibración lateral en vigas.	13
3.5. Viga Timoshenko.	15
4. Materiales y Métodos.	17
4.1. Elementos en material fibrorreforzado.	17
4.2. Daño controlado.....	19
4.3.1. Elementos para ensayos de transmisión.....	19
4.3.2. Elementos para ensayo de resonancia.....	20
4.3. Ensayos no destructivos para detección de defectos.	22
4.3.1. Ensayo de Transmisión sin contacto con Incidencia Normal.	22
4.3.1.1. Montaje para ensayo de transmisión.....	22
4.3.1.2. Procedimiento Ensayo de Transmisión.	23
4.3.1.3. Procesamiento de Datos.	23
4.3.2. Ensayo de Resonancia.	24
4.3.2.1. Análisis Modal Experimental	25
4.3.2.2. Montaje para ensayo de resonancia.	25

4.3.2.3.	Procedimiento para el ensayo de resonancia	26
4.3.2.4.	Procesamiento de datos.....	27
5.	Resultados.....	29
5.1.	Procedimiento para Detección de Defectos con Ensayo de Transmisión.....	29
5.1.1.	Detección de Defectos en Placas de 3mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido. 33	
5.1.2.	Detección de Defectos en Riel de 15mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido... 34	
5.1.3.	Detección de Defectos en Riel de 19mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido... 37	
5.2.	Ensayo De Resonancia Para Identificación De Defectos.	38
5.2.1.	Ensayo en placa de aluminio.	38
5.2.2.	Ensayo de resonancia en material reforzado con fibra de carbono.	43
5.3.	Procedimiento para evaluación del daño.	46
CONCLUSIONES.		48
TRABAJOS FUTUROS.....		49

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1 Dimensiones de elementos contruidos en material compuesto.	18
Tabla 4.2 Geometría y propiedades de la placa de aluminio para dominio de la técnica de análisis modal.	21
Tabla 5.1 Frecuencias propias y factores de amortiguamiento de la placa de aluminio según la posición del daño (Variaciones respecto a los datos de la placa sana).	43
Tabla 5.2 Frecuencias Propias y Factores de Amortiguamiento del Primer Modo, Para Placas en Fibra de Carbono.	44
Tabla 5.3 Frecuencias Propias y Factores de Amortiguamiento del Segundo Modo, Para Placas en Fibra de Carbono.	44

LISTADO DE FIGURAS

Figura1.1 Partes de fijador externo monolateral.	2
Figura1.2 Crecimiento del cayo oseó durante el procedimiento de osteogénesis.	3
Figura 3.1 Fenómeno de transmisión, incidencia normal.	7
Figura 3.2 Fenómeno de transmisión, incidencia normal en tres medios.	9
Figura 3.3 Ruta teórica Vs Ruta experimental.	10
Figura 3.4 Sistema masa-amortiguador-resorte.	11
Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre de vibración lateral de vigas, a) viga completa b) elemento diferencial.	13
Figura 4.1 Fibra de carbón trenzada en presentación de tela, utilizada para fabricación de elementos fibrorreforzados.	17
Figura 4.2 Elemento tipo placa terminado, construido en material fibrorreforzado.	18
Figura 4.3 Elemento tipo riel terminado, construido en material fibrorreforzado.	18
Figura 4.4 Daño controlado, delaminación con teflón insertada entre las capas durante la construcción del elemento tipo placa.	19
Figura 4.5 Placa de 3mm con daño controlado, con lámina de teflón.	20
Figura 4.6 Riel con espesor de 15mm, con delaminaciones sencilla, doble y triple capa de teflón, de 10x10mm.	20
Figura 4.7 Riel de 19mm de espesor, con delaminaciones de doble capa, con anchos de 5mm, 10mm, 15mm y 20mm.	20
Figura 4.8 Placa en aluminio con daño inducido.	21
Figura 4.9 Placa con daño controlado empotrada para prueba de resonancia.	22
Figura 4.10 Placa general con un lado sano y un lado con defecto.	22
Figura 4.11. Montaje para ensayo de transmisión.	24
Figura 4.12 Respuesta ensayo de transmisión en dominio temporal riel espesor de 15mm.	24
Figura 4.13 Función de respuesta en frecuencia alrededor de una frecuencia de resonancia, Magnitud (V) y Fase (grados).	26
Figura 4.14 Montaje para análisis de resonancia excitado con Martillo.	27
Figura 4.15 Montaje para análisis de resonancia excitado con Shaker.	28
Figura 5.1 Respuesta normalizada de la señal transmitida con y sin muestra en fibra de carbono (riel de 15mm).	29

Figura 5.2 Longitud de onda para elementos contruidos en fibra de carbono, para un rango de frecuencias de 100kHz a 400kHz.....	31
Figura 5.3 Representación en frecuencia de señal transmitida entre transductores con frecuencias centrales de 250 kHz y 400 kHz, sin muestra	31
Figura 5.4 Representación en frecuencia de señal transmitida entre transductores, con muestra de 15mm de espesor.....	32
Figura 5.5 Resultado prueba de transmisión en placa comparando zona sin daño (parte superior) y placa con daño (parte inferior).	33
Figura 5.6 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo placa de 3mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.	35
Figura 5.7 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo riel de 15 mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.	36
Figura 5.8 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo riel de 19 mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.	37
Figura 5.9 Análisis de convergencia de resultados en elementos finitos. Eje x refinamiento de malla, eje y Frecuencia normalizada, referencia malla burda.	39
Figura 5.10 Excitación y respuesta de la placa de aluminio en dominios temporal (izq.) y frecuencial (der.).....	39
Figura 5.11 Función de respuesta en frecuencia de los primeros dos modos.....	40
Figura 5.12 Frecuencias propias de una muestra tipo placa de aluminio en cantiléver obtenidas por tres métodos diferentes: Numérico, Analítico y Experimental.....	41
Figura 5.13 Primer modo placa de aluminio en cantiléver a 45.5Hz, comparación entre teórico y experimental.	42
Figura 5.14 Segundo modo de la placa de aluminio en cantiléver a 296.6Hz.	42
Figura 5.15 Primeras frecuencias propias de elementos en fibra. Eje x: placa evaluada, eje y: frecuencia en Hertz	45
Figura 5.16 Curvas de distribución normal placa con defecto y placa sana frecuencia del primer modo.	46
Figura 5.17 Procedimiento general para evaluación de rieles.....	47

1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los métodos quirúrgicos más utilizados para la corrección de defectos óseos es el transporte por osteogénesis [1]. Este procedimiento se utiliza debido a que provee buena estabilidad de la fractura y buen manejo de los tejidos blandos, para pacientes que han sufrido accidentes de tránsito o personal de las fuerzas militares que han sido heridos en combate, quienes regularmente presentan fracturas óseas abiertas o con alto grado de tejido comprometido. Las lesiones son tratadas según su gravedad. En el caso de presentarse infecciones, parte del tejido es retirado y repuesto con el procedimiento de transporte óseo.

El procedimiento de transporte óseo, con el método de Ilizarov conocido como osteogénesis por distracción, involucra el uso de un fijador externo. En la Figura 1.1 se muestra un fijador externo monolateral el cual está compuesto principalmente por cuatro partes:

- El riel es el encargado de la estabilidad del fijador. Es quien reemplaza las funciones estructurales brindadas por el hueso.
- Los clavos son la extensión del hueso que se conecta con el fijador. Son la única parte del fijador que ingresa en el hueso.
- Las prensas son las encargadas de conectar los clavos con el riel y permitir el deslizamiento a través del riel.
- El distractor es el encargado de someter el hueso a esfuerzos de tensión y compresión, encargado del procedimiento de alargamiento.

En la actualidad existen diferentes métodos para la atención de lesiones óseas con la técnica de transporte óseo, de los cuales solo se hace referencia al método de Ilizarov que es el más común. Este método es utilizado en lesiones que involucran más de 3cm de pérdida ósea. El procedimiento consiste en la formación de hueso entre dos superficies en las cuales se genera un callo óseo. Las superficies van siendo separadas gradualmente, lo recomendado es 0,25mm cada 6 horas hasta completar la longitud del hueso faltante como se muestra en la Figura 1.2, donde se presenta el callo óseo generado por el movimiento de tracción [2].

Los elementos de transporte óseo monolateral, son contruidos generalmente en materiales metálicos los cuales tienen buenas propiedades mecánicas que permiten dar estabilidad al transportador. Uno de los defectos visto desde el punto de vista de confort del paciente, es el peso que tienen los fijadores contruidos en materiales metálicos convencionales. Además, está la dificultad que se presenta para el equipo médico en el momento que se toman los rayos X para el seguimiento a la formación del callo, ya que los materiales metálicos absorben una gran cantidad de energía durante el procedimiento, lo que dificulta la visualización del avance de la sanación del hueso. Otra gran dificultad es que estos elementos no son de fabricación nacional, por lo que deben ser importados, lo que termina en un alto costo para el usuario. Como respuesta a estas dificultades, se ha explorado en la construcción de fijadores externos monolaterales en materiales fibrorreforzados. Tal es el caso del Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Universidad del Valle, donde se han diseñado procedimientos para la fabricación de fijadores en

fibra de carbono, los cuales son evaluados comparando sus propiedades con elementos fabricados comercialmente en fibra de carbono y materiales Metálicos [3-7].

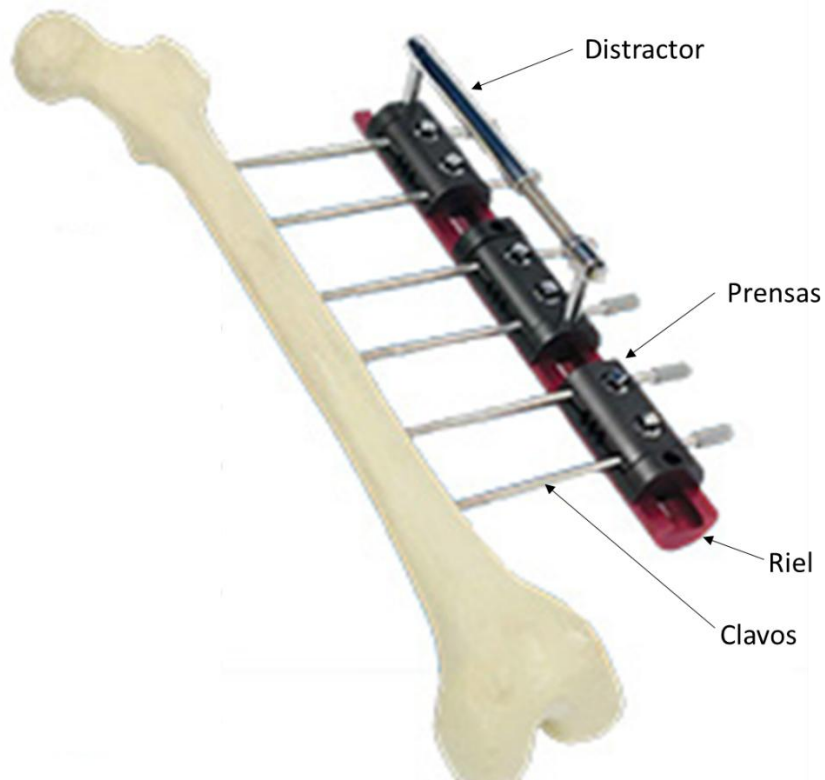


Figura1.1 Partes de fijador externo monolateral.

El principal problema de utilizar materiales fibrorreforzados no comerciales es que la construcción de las piezas es artesanal y se necesita evaluar el estado de éstas con algún control de calidad.

En el presente trabajo se plantea un procedimiento que incluye ensayos no destructivos que permiten evaluar el estado del riel construido en fibra de carbono sin invadir o afectar sus propiedades mecánicas, ya que los defectos presentes en materiales fibrorreforzados no son identificables a simple vista, sino que van creciendo en el interior del elemento hasta causar una falla catastrófica. Se eligió estudiar el riel porque es el elemento encargado de brindar la rigidez del sistema y por su tamaño es más propenso a tener imperfecciones en su interior

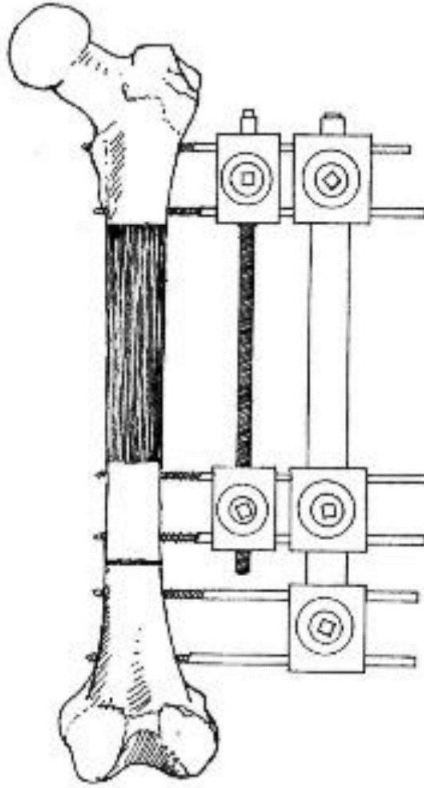


Figura1.2 Crecimiento del cayo oseo durante el procedimiento de osteogénesis.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Establecer un procedimiento basado en técnicas no destructivas para inspeccionar rieles de fijador externo construido en fibra de carbono

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar pruebas convencionales de ultrasonido con y sin contacto a elementos contruidos en fibra de carbono, para verificar si las características de los ensayos son aplicables a elementos contruidos en fibra de carbono.
- Implementar técnicas de análisis modal experimental a muestras de rieles de fibra de carbono fabricados en el laboratorio de ensayos dinámicos y Materiales Fibrorreforzados.
- Valorar la capacidad de las técnicas implementadas para detectar tipos de defectos por medio de la comparación con un riel patrón o de referencia.

3. Marco teórico.

3.1. Introducción

Para los fabricantes de elementos mecánicos es muy importante seleccionar materiales que puedan cumplir con los requerimientos en los que vaya a ser utilizado. Pero la selección de materiales cada vez va más allá de sólo cumplir con las especificaciones de uso. Se busca que los materiales brinden un mayor aporte al elemento construido como lo es el bajo costo o mejorar sus propiedades. Una opción que está siendo utilizada con mayor frecuencia es el uso de materiales compuestos, como los materiales reforzados, entre ellos está la fibra de carbono, debido a sus características tales como la relación peso y resistencia a la tensión, estabilidad térmica, resistencia a la fatiga, alta rigidez, alta conductividad, auto-lubricación, resistencia a la corrosión, entre otras. Estas propiedades son obtenidas como una combinación macroscópica o microscópica de las propiedades de dos materiales insolubles entre ellos, lo que permite un complemento de sus características [9]. Debido a la forma de su fabricación, la mayor resistencia en materiales compuestos se presenta en el sentido de las fibras del material de refuerzo ya que las propiedades en sentido transversal dependen de la capacidad de unión entre los dos materiales [10]. Debido a la manera en la que se construye el polímero reforzado con fibra de carbono la presencia de daños es imperceptible debido a que se presentan al interior del elemento entre las capas de fibra.

3.2. Daños más comunes en fibra de carbono.

Los daños en materiales reforzados con fibra de carbono debilitan la estructura del material cuando la falla se presenta al interior generando un concentrador de esfuerzos que va creciendo de manera indetectable a simple vista hasta causar un daño catastrófico por separación de las capas del material de refuerzo. A pesar de la diversidad de los daños, existen tres momentos en los que puede ocurrir un defecto: en la fabricación de la fibra, durante la construcción del material fibrorreforzado y durante su vida en servicio [11-13]. Durante el procedimiento de fabricación de la fibra de carbono, la fibra está en constante rozamiento con los elementos de máquina encargados de su fabricación y con ella misma, lo que puede causar microfisuras en la fibra que debilitan su resistencia, causando posibles separaciones, delaminaciones, roturas y pérdida de resistencia. Durante la fabricación del material fibrorreforzado, debido a la manipulación de los elementos, se pueden presentar diferentes situaciones que pueden causar daños como la inclusión de materiales extraños como grasa, que dificulte la adhesión de las capas de fibra causando posibles delaminaciones durante el procedimiento de curado. Otro tipo de elementos extraños pueden ser elementos con baja resistencia la cual puede fallar y causar una delaminación o convertirse en un concentrador de esfuerzos que causará daños al interior del compuesto: También se pueden presentar casos de porosidad o burbujas de aire comprimido atrapado entre las capas de fibra y resina causando concentradores de esfuerzo. La presencia de arrugas de la tela de fibra puede favorecer atrapamientos de aire o causar disminución de la resistencia del material compuesto. Otra anomalía es la inadecuada combinación entre la cantidad de fibra y la cantidad de resina presente en el compuesto, lo que causa cambios en la rigidez del material o atrapamientos de burbujas de aire. El otro origen común de las fallas en materiales fibrorreforzados es durante su vida en servicio, ya que el elemento puede estar sometido a un impacto o un sobre esfuerzo, lo que puede causar ruptura de las fibras o un daño en la matriz del material generando una separación entre capas que aunque

puede ser pequeña, puede crecer hasta convertirse en una delaminación y provocar un daño global del material [11-13].

3.3. Ensayos no destructivos.

Para materiales compuestos, principalmente se utilizan dos categorías de ensayos para la evaluación de sus propiedades. La primera categoría consiste medir las propiedades del material mediante ensayos destructivos. La otra categoría es para evaluar el estado general al interior de elementos para propósitos de control de calidad, a los cuales se les conoce como ensayos no destructivos [14]. En la actualidad existen diferentes técnicas que permiten evaluar la integridad de un elemento, que van desde la inspección visual hasta el uso de herramientas complejas como las termografías, donde la complejidad varía según la precisión requerida para identificar el daño. A continuación, se mencionan algunos ensayos no destructivos aplicables a materiales fibrorreforzados.

3.3.1. Inspección por Ultrasonido.

El ensayo por ultrasonido es uno de los métodos más utilizados para la inspección del estado de materiales en general. Consiste en hacer incidir ondas acústicas/mecánicas a través de un material a una frecuencia superior a 20 KHz y medir la intensidad y el tiempo de respuesta entre la emisión y la recepción de la onda [11-14]. La principal desventaja de este método es cuando el material inspeccionado es muy poroso, con diferencias de densidad en su interior, tiene una alta impedancia o no presenta una distribución uniforme de su estructura, lo que causa dispersión de la señal dificultando su recepción. Existen dos técnicas principales de aplicación de la técnica de ultrasonido:

3.3.1.1. Pulso-Eco

La técnica de pulso-eco consiste en hacer incidir ondas ultrasónicas en la superficie de un elemento, las cuales atraviesan la totalidad del elemento; al completar su recorrido y llegar a la superficie posterior, parte de la señal se refleja y parte se transmite. La señal que se refleja es captada nuevamente ya sea por el mismo emisor o por un receptor independiente a lo que se le conoce como configuración en pitch catch. La técnica de pulso eco consiste en medir la intensidad y el tiempo que tarda en retornar la señal al punto de emisión. Cuando se presenta un defecto al interior del elemento evaluado, el tiempo de retorno de la señal es menor ya que el defecto se encuentra a una menor distancia que el de la superficie posterior [11-14]. El procedimiento se puede realizar con el transductor acoplado directamente en el material con la ayuda de un gel para garantizar el acoplamiento entre el transductor y la superficie del elemento o a una distancia conocida sumergiendo el transductor en un fluido, ya sea en aire o en agua, para garantizar la continuidad de las ondas.

3.3.1.2. Prueba de transmisión.

En la prueba de transmisión se utilizan dos transductores, uno encargado de la emisión de la señal y otro encargado de la recepción. La prueba consiste en medir el tiempo que tarda en llegar la señal del emisor al receptor y la intensidad de la señal de recepción con respecto a la intensidad de la señal de emisión. Cualquier variación en el tiempo o la intensidad de la señal indica la presencia de una discontinuidad o defecto en su interior [11-14].

3.3.2. Fenómeno de transmisión en incidencia normal.

En el análisis del fenómeno de transmisión se asume que la forma como se propaga una onda entre dos sistemas es de manera plana. La transmisión de ondas a través de un medio es la transmisión

de energía de un punto a otro que se puede medir de diferentes maneras, entre ellas la diferencia de presión o de velocidad. Dos formas generales de clasificar la transmisión de ondas es la dirección de propagación con respecto a su fuente. Es así como se tienen las ondas longitudinales, las cuales se refieren a las ondas que se transmiten en la misma dirección que la oscilación de las partículas y las ondas transversales, que se transmiten en una dirección perpendicular a la oscilación de las partículas. Se puede asumir que la transmisión de movimiento de una partícula en un medio debido a transmisión de onda se da de manera armónica compleja como:

$$\xi = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \quad 1$$

Donde ξ es el desplazamiento de la partícula, A es la magnitud del desplazamiento en la dirección positiva del eje de coordenadas asumido, B es la magnitud del desplazamiento en la dirección negativa, j es $\sqrt{-1}$, ω es la frecuencia de la onda, t es el tiempo, x es la posición de la partícula y k es el número de onda ω/c , siendo c la velocidad de transmisión de la onda en el medio. Para que una onda pueda viajar a través de un material, la energía de la onda debe vencer una resistencia propia del material conocida como impedancia, la cual se puede describir como la relación entre el cambio de la presión con respecto a la velocidad de la partícula, dando como resultado que la impedancia es igual a:

$$z = \frac{P}{u} = \rho_0 c \quad 2$$

Donde z es la impedancia lo cual es una propiedad característica del material, P es la presión, u es la velocidad de la partícula, ρ_0 es la densidad de equilibrio del medio.

Cuando una onda impacta en la intersección de dos medios contiguos, se producen dos ondas; la primera se trata de una onda reflejada que se propaga en el mismo medio de la onda incidente y la segunda es una onda transmitida que se propaga en el segundo medio. La amplitud de la presión y la intensidad de las ondas reflejada y transmitida dependen de la impedancia de cada medio y del ángulo de incidencia de la onda impactante.

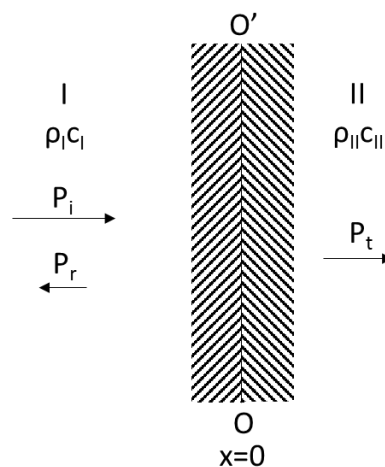


Figura 3.1 Fenómeno de transmisión, incidencia normal.

Asumiendo una onda que viaja en un medio I tiene una presión que se puede expresar de la forma:

$$P_i = A_1 e^{j(\omega t - k_I x)} \quad 3$$

De la misma manera las presiones de las ondas reflejada y transmitida son de la forma:

$$P_r = B e^{j(\omega t + k_I x)} \quad 4$$

$$P_t = A_2 e^{j(\omega t - k_{II} x)} \quad 5$$

Donde P_i , P_r y P_t son las presiones incidente, reflejada y transmitida respectivamente y A_1 , B y A_2 son constantes que representan las magnitudes de las presiones de las ondas incidente, reflejada y transmitida respectivamente como se muestra en la Figura 3.1. La frecuencia de las ondas incidente, reflejada y transmitida son iguales, pero el número de onda en los dos medios es diferente ya que depende de las características de cada medio en el que se propagan. Dos condiciones que deben cumplirse en la frontera donde se conectan los dos medios son que la presión en la interface siempre debe ser la misma a los dos lados de la frontera como consecuencia de la ley fundamental que la presión debe ser constante en un fluido, la segunda es que la velocidad normal en ambas caras del borde de los medios debe ser igual ya que los dos medios permanecen en contacto constante.

Con estas dos condiciones de frontera se puede demostrar que:

$$A_1 + B = A_2 \quad 6$$

$$B = A_1 \frac{\rho_{II} c_{II} - \rho_I c_I}{\rho_{II} c_{II} + \rho_I c_I} \quad 7$$

$$A_2 = A_1 \frac{2\rho_{II} c_{II}}{\rho_{II} c_{II} + \rho_I c_I} \quad 8$$

Con estas relaciones se puede entender que la presión de la onda transmitida siempre estará en fase con la onda incidente, mientras que la onda reflejada depende de la diferencia de impedancia entre los dos medios [15, 16].

Para el caso específico de este trabajo, se trata de un fenómeno de transmisión de incidencia normal en tres medios como se muestra en la Figura 3.2, en este caso la energía transmitida en el medio II se convierte en una onda incidente que tiene una reflexión cuando tiene contacto con la frontera PP' ubicada cuando $x=L$. En esta frontera se genera una onda transmitida P_t en un medio con propiedades $\rho_{III} c_{III}$ [15, 16].

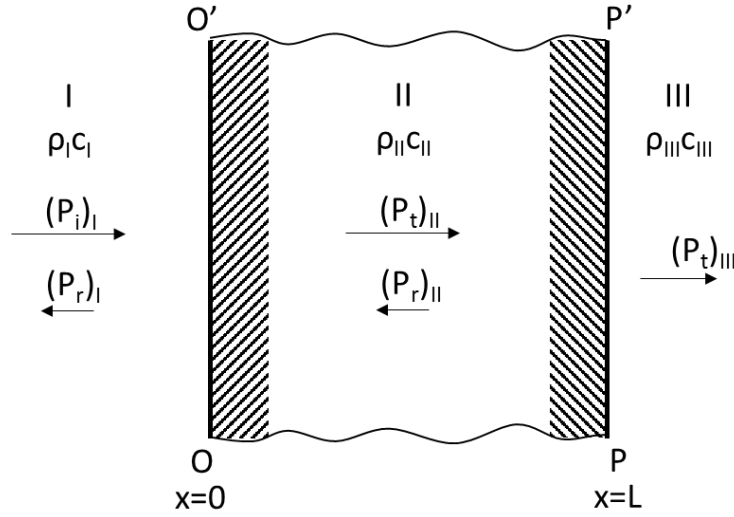


Figura 3.2 Fenómeno de transmisión, incidencia normal en tres medios.

Manteniendo las mismas condiciones en la frontera, ahora se tiene que:

$$(P_r)_{II} = B_2 e^{j(\omega t + k_{II} x)} \quad 9$$

$$(P_t)_{III} = A_3 e^{j(\omega t - k_{III}(x-L))} \quad 10$$

Ahora la amplitud de la energía transmitida en el medio III queda de la forma [15, 16]:

$$A_3 = \frac{1}{A_1} \left[\frac{(\rho_{III} c_{III} + \rho_I c_I) \cos k_{II} L}{2 \rho_{III} c_{III}} + \frac{j(\rho_{II}^2 c_{II}^2 + \rho_{III} c_{III} \rho_I c_I) \sin k_{II} L}{2 \rho_{III} c_{III} \rho_{II} c_{II}} \right]^{-1} \quad 11$$

3.3.3. Prueba de resonancia.

Los ensayos de resonancia de un material consisten en identificar las frecuencias propias de vibración, los desplazamientos modales y el factor de amortiguamiento de los elementos evaluados. Los parámetros modales de cada elemento dependen de su estructura y geometría [11]. Cuando se presenta un daño en uno de los elementos, se presenta un cambio de rigidez o una disminución de masa que pueden afectar su respuesta ante una excitación externa provocando cambios en las frecuencias propias y en las amplitudes de los desplazamientos modales [17]. La mayor fortaleza de este ensayo es que se pueden detectar defectos pequeños que afecten la estructura, incluso defectos que no pueden ser detectados con los métodos tradicionales de ultrasonido. Como principal desventaja de este ensayo es que se puede realizar solamente en elementos de geometría simple y que permitan una medición de la energía de ingreso y la energía de salida [18].

3.3.4. Análisis modal.

El método de inspección volumétrico por análisis modal permite determinar tres aspectos dinámicos básicos de un elemento que son: las frecuencias propias o de resonancia, la forma de los modos o comportamiento y el coeficiente de amortiguamiento [19]. El análisis modal describe la respuesta de un elemento ante una vibración o perturbación y la respuesta se presenta de manera invariante en el tiempo. Los modos naturales de una vibración son determinados por las propiedades físicas de un elemento (masa, rigidez y amortiguamiento) [20], lo que permite evaluar las condiciones como integridad o confiabilidad de un elemento, evaluar su estado interno posterior a incidentes o cambios en su diseño [21].

El análisis modal se puede ejecutar ya sea de manera teórica o de manera experimental, el cual le permite realizar el análisis como lo muestra la Figura 3.3.

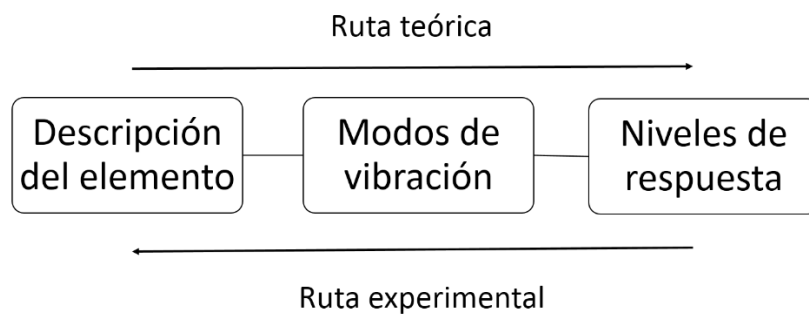


Figura 3.3 Ruta teórica Vs Ruta experimental

Para llevar a cabo el análisis modal se deben tener en cuenta cuatro consideraciones básicas [20]:

- El comportamiento de la estructura es lineal, es decir que la respuesta del elemento a cualquier combinación de fuerzas aplicadas de manera simultánea es la suma de las respuestas individuales para cada fuerza como si fuera aplicada de manera individual.
- El elemento es invariante en el tiempo, es decir que los parámetros a determinar permanecen constantes.
- El elemento obedece la ley de reciprocidad de Maxwell: una fuerza aplicada en el grado de libertad p produce una respuesta en el grado de libertad q igual a una respuesta en el grado de libertad p si se aplicara la fuerza en el grado de libertad q .
- El elemento es observable, la información extraída de la prueba debe ser suficiente para generar un adecuado modelo del comportamiento del elemento.

La manera más fácil para entender el análisis modal es comparar el caso de un sistema masa-amortiguador-resorte despreciando la fuerza de fricción, con un solo grado de libertad, Figura 3.4. Para los sistemas con más grados de libertad, el sistema se asume como la suma de varios sistemas con un grado de libertad [20].

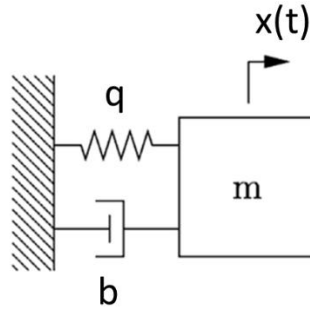


Figura 3.4 Sistema masa-amortiguador-resorte.

Donde m es la masa del elemento, q es la constante de rigidez, b es la constante de amortiguamiento y $x(t)$ es el desplazamiento del elemento. La ecuación diferencial que describe el movimiento es de la forma:

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + qx = f(t), \quad 12$$

donde $f(t)$ es la fuerza aplicada en el sentido del desplazamiento. Por el momento, para tener la ecuación homogénea, se despreciará el efecto de la fuerza, entonces $f(t)=0$.

Teniendo en cuenta la teoría de ecuaciones diferenciales [20], una descripción del desplazamiento se da de la forma:

$$x(t) = Xe^{i\omega t} \quad 13$$

Sustituyendo 13 en 12 y resolviendo se tiene:

$$(m\omega^2 + b\omega + q)Xe^{i\omega t} = 0 \quad 14$$

Para una solución no trivial, se tiene que:

$$(m\omega^2 + b\omega + q) = 0 \quad 15$$

Para condiciones de simplicidad se asume el amortiguamiento como despreciable por el momento, por lo tanto, la solución a la ecuación 15 debe darse de la forma:

$$\omega = \sqrt{\frac{q}{m}} \quad 16$$

donde ω será la frecuencia natural para un sistema con un solo grado de libertad sin amortiguamiento. Si el amortiguamiento no es despreciable la solución a la ecuación 15 se da de la forma:

$$\omega_{1,2} = -\overline{\omega}_0\xi \pm i\overline{\omega}_0\sqrt{1 - \xi^2} \quad 17$$

Donde:

$$\overline{\omega_0}^2 = \frac{q}{m} ; \xi = \frac{b}{2\sqrt{qm}}$$

Por lo tanto, la forma de la respuesta tiene una componente real y una componente imaginaria.

Para sistemas con múltiples grados de libertad, la solución a la ecuación 15 despreciando el amortiguamiento es:

$$\det|[Q] - \omega^2[M]| = 0 \quad 18$$

Donde [Q] y [M] son las matrices de rigidez y de masa respectivamente.

Los resultados que darían solución a la ecuación 18, son las frecuencias naturales del sistema de múltiples grados de libertad a los que resonaría el sistema, y los valores que satisfagan el valor de X de la ecuación 14, serán los que definan la forma de los modos como se comportará el sistema a las frecuencias naturales halladas.

Para el caso en el que la fuerza de entrada no puede ser despreciable, se recurre al uso de la herramienta de la función de respuesta en frecuencia, la cual se encarga de comparar la energía de respuesta del sistema con la energía suministrada de la forma:

$$FRF = H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \quad 19$$

Teniendo en cuenta el amortiguamiento y asumiendo respuesta como se muestra en la ecuación 16 y una excitación armónica de la forma:

$$f(t) = Fe^{i\omega t} \quad 20$$

La ecuación de desplazamiento queda de la forma:

$$\alpha(\omega) = ([Q] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1} \quad 21$$

Donde los datos tanto de la fuerza como del desplazamiento deben encontrarse en el dominio frecuencial.

3.4. Vibración lateral en vigas.

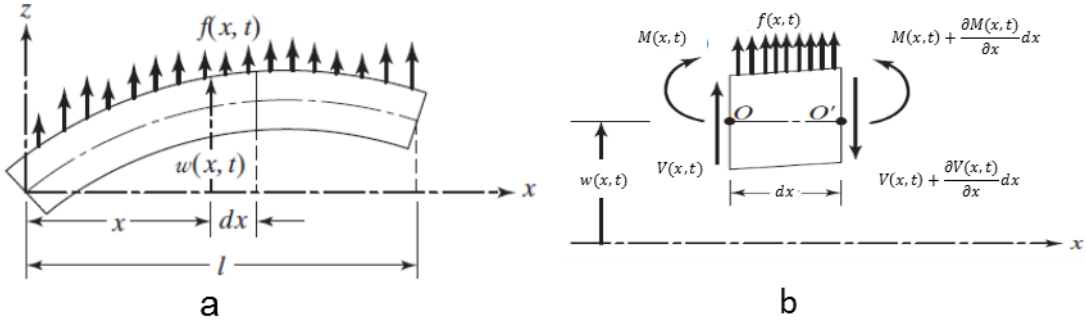


Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre de vibración lateral de vigas, a) viga completa b) elemento diferencial.

Considere un diagrama de cuerpo libre de una viga sometida a flexión como el que se muestra en la Figura 3.5, donde la sumatoria de esfuerzos en la dirección z y sumatoria de momentos en el punto O quedan de la forma:

$$-\left(V + \frac{\partial V}{\partial x} dx\right) + f(x, t) dx + V = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad 22$$

$$\left(M + \frac{\partial M}{\partial x} dx\right) - \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} dx\right) dx + f(x, t) dx \frac{dx}{2} - M = 0 \quad 23$$

Donde el término a la derecha de la ecuación 22 por segunda ley de Newton se refiere al producto de la masa por la aceleración del elemento en la dirección z , dx se refiere a la distancia evaluada de la viga, w es el desplazamiento en el eje z , V se refiere a la fuerza cortante, M se refiere al momento flector, ρ se refiere a la densidad de la viga, $f(x, t)$ es una fuerza externa distribuida actuando en la superficie de la viga, $A(x)$ es el área que depende de la posición donde se realice el análisis.

Asumiendo el teorema de Euler-Bernoulli para vigas a flexión, se tiene que:

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad 24$$

Donde E se refiere al módulo de elasticidad e I se refiere al segundo momento respecto al área.

Simplificando y resolviendo las ecuaciones 22 y 23, reemplazando el valor de M con la ecuación 24, asumiendo vibración libre, es decir, $f(x, t) = 0$ y asumiendo que el área y el momento de inercia son constantes independientes de la ubicación, entonces se tiene:

$$p^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad 25$$

Donde:

$$p = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad 26$$

En este caso, la ecuación 25, es la ecuación diferencial para hallar el desplazamiento de una viga sometida a flexión. Como se tiene la ecuación en términos de la distancia en x y el tiempo, para resolver la ecuación diferencial se utiliza la forma:

$$w = F(x)G(t), \quad 27$$

donde F(x) es una función que solo depende de la posición y G(t) es una función que solo depende del tiempo, resolviendo la cuarta derivada con respecto a x y la segunda derivada con respecto a t se tiene:

$$\frac{p^2}{F(x)} \frac{\partial^4 F(x)}{\partial x^4} = -\frac{1}{G(t)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \omega^2 \quad 28$$

Siendo ω^2 una constante positiva. Se tienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - \beta^4 F = 0 \quad 29$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial t^2} + \omega^2 G = 0 \quad 30$$

Siendo:

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{p^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad 31$$

Resolviendo para la ecuación 30 se tiene:

$$G(t) = R_1 \cos \omega t + R_2 \sin \omega t \quad 32$$

Y resolviendo la ecuación 29 se tiene:

$$F(x) = C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x \quad 33$$

La solución general para el desplazamiento de cualquier punto de la viga se obtiene reemplazando las ecuaciones 32 y 33 en la ecuación 27. Pero esta ecuación no es suficiente para definir la ecuación de desplazamiento en el eje z, ya que esta ecuación puede tener múltiples soluciones. Debido a eso, para tener una única solución se debe limitar la ecuación con las condiciones de frontera. Para entender cómo acotar el desplazamiento con las condiciones de frontera se debe tener claro que:

Zona de la viga sin desplazamiento $w = 0$, zona de la viga sin desplazamiento angular $\frac{\partial w}{\partial x} = 0$, zona de la viga sin momento flector $M = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$, zona de la viga sin esfuerzo cortante $V = \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0$

Según la condición de frontera, la viga debe cumplir con algunas de las restricciones mencionadas.

Para el caso del presente trabajo, las pruebas se realizarán en vigas en cantiléver, que están empotradas en un lado y libres en el otro, el movimiento permitido solo será en la dirección vertical, lo que indica que las condiciones de frontera deben satisfacer que:

$$w(0) = 0; \frac{\partial w(0)}{\partial x} = 0; M = \frac{\partial^2 w(L)}{\partial x^2} = 0; V = \frac{\partial^3 w(L)}{\partial x^3} = 0;$$

Para hallar las frecuencias propias de un elemento se utilizan las condiciones de frontera mencionadas y se reemplazan en la ecuación 33 donde se obtiene que:

$$\cos \beta_n l \cosh \beta_n l = -1 \quad 34$$

Donde la solución a la ecuación 31 queda de la forma:

$$\omega_n = \left(\frac{2n-1}{2} \pi + m \right)^2 \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad 35$$

Siendo ω_n La frecuencia propia, n el número del modo, L el largo del elemento, E módulo de elasticidad, I momento de inercia, A área trasversal del elemento, ρ densidad del material, m depende del modo seleccionado, siendo 0,3042 si $n=1$, -0,018 si $n=2$, 0,001 si $n=3$ y 0 si $n>3$ [22].

3.5. Viga Timoshenko.

En las vigas Timoshenko se tiene en cuenta la deformación por esfuerzo cortante, lo cual se despreció en el análisis anterior, entonces se tienen en cuenta dos deformaciones angulares, una debida al esfuerzo cortante que será llamada como: $\theta(x, t)$ y la deformación angular debida a la flexión pura, que se llamará: $\psi(x, t)$. Por lo tanto, la deformación total será de la forma:

$$w_{,x}(x, t) = \psi(x, t) + \theta(x, t) \quad 36$$

La fuerza cortante neta queda de la forma:

$$V = GA_s \theta = GA_s (w_{,x} - \psi) \quad 37$$

Donde: $A_s = A/k$, A es el área de la sección transversal, k es un factor de corrección porque la fuerza cortante no es constante a lo largo de la viga, G es el esfuerzo cortante y ρ es la densidad de masa. Aplicando la segunda ley de Newton se tiene:

$$(\rho A dx)w_{,tt} = V(x + dx) - V(x) \Rightarrow \rho A w_{,tt} = [GA_s(w_{,x} - \psi)]_{,x} \quad 38$$

La ecuación de rotacional dinámica puede ser escrita de la forma:

$$\rho I \psi_{,tt} = GA_s(w_{,x} - \psi) + [EI \psi_{,x}]_{,x} \quad 39$$

Para el caso de vigas uniformes, se tienen las siguientes simplificaciones:

$$\rho A w_{,tt} = GA_s(w_{,xx} - \psi_{,x}) \quad 40$$

$$\rho I \psi_{,tt} = GA_s(w_{,x} - \psi) + EI \psi_{,xxx} \quad 41$$

Derivando la ecuación 41 con respecto a x , se tiene:

$$\rho I \psi_{,xtt} = GA_s(w_{,xx} - \psi_{,x}) + EI \psi_{,xxx} \quad 42$$

Despejando $\psi_{,x}$ de la ecuación 40 y reemplazando en la ecuación 42 se tiene que:

$$\frac{\rho I}{GA_s} w_{,tttt} + w_{,tt} - \left(\frac{I}{A} + \frac{EI}{GA_s} \right) w_{,ttxx} + \frac{EI}{\rho A} w_{,xxxx} = 0 \quad 43$$

Esta es una ecuación diferencial de cuarto orden en espacio y tiempo que representa la dinámica transversal de una viga Timoshenko uniforme [23].

4. Materiales y Métodos.

En la siguiente sección se presentarán los materiales y procedimientos de construcción de elementos en material fibrorreforzado. También se describen los procedimientos que se llevaron a cabo para evaluar elementos contruidos en fibra de carbono que permitieron identificar daños en su interior.

4.1. Elementos en material fibrorreforzado.

Los elementos para evaluación se construyeron en material fibrorreforzado con forma de placa y de riel. Se utilizó como material matriz resina epóxica y como refuerzo fibra de carbono en presentación trenzada, la cual viene en forma de tela plana 3K referencia HexForce 282, la cual presenta la dirección de las fibras a 0° y 90°, como se muestra en la Figura 4.1. El procedimiento elegido para la fabricación de los elementos fue el de compactación, el cual consiste en combinar el material matriz con el refuerzo y someterlos a presión dentro de un molde con la forma final del elemento como los que se muestran en la Figura 4.2, y en la Figura 4.3, buscando que el material base penetre los intersticios de la tela y se tenga una mayor adhesión. Se busca que la presión del molde obligue a salir el exceso de resina y aire, para que no se generen poros, excesos de resina o inclusiones de aire localizados. El procedimiento para mezclar la matriz y el refuerzo consiste en dar las dimensiones a la tela de fibra de carbono buscando que el volumen final de la combinación tela-resina cumpla con el porcentaje de refuerzo-matriz elegido. En este caso la relación esperada es de 60% de fibra con respecto a la resina. La resina que se utilizó viene en presentación líquida a temperatura ambiente, por lo que debe ser mezclada con un catalizador (endurecedor) que le permita cambiar su estado de líquido viscoso a sólido en un tiempo conocido como tiempo de curado. Una vez la resina está combinada con el catalizador, se procede a impregnar la tela buscando una distribución uniforme en la tela. En este caso, el procedimiento consiste en generar rollos de tela impregnada, los cuales se ubicaron en moldes contruidos en materiales metálicos con la forma final del elemento y se les aplicó presión. Posteriormente se dejó curar por un tiempo de 24 horas, para que el nuevo material obtenga las propiedades mencionadas anteriormente.



Figura 4.1 Fibra de carbón trenzada en presentación de tela, utilizada para fabricación de elementos fibrorreforzados.

Los tamaños finales de los elementos contruidos en fibra de carbono y la cantidad de tela utilizada se muestran en la Tabla 4.1. La forma final de placas y rieles se muestra en las Figura 4.2 y 4.3 respectivamente

Tabla 4.1 Dimensiones de elementos contruidos en material compuesto.

MEDIDAS PARA CONSTRUCCION DE ELEMENTOS EN MATERIAL COMPUESTO						
ELEMENTO	ELEMENTO FINAL (mm)			TELA DE FIBRA DE CARBONO (mm)		PORCENTAJE (%)
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	LARGO	ANCHO	
PLACA	300	25	3	320	300	60
RIEL	420	19	15	1400	470	60



Figura 4.2 Elemento tipo placa terminado, construido en material fibrorreforzado.



Figura 4.3 Elemento tipo riel terminado, construido en material fibrorreforzado.

4.2. Daño controlado.

Existen diferentes maneras de inducir daños en materiales compuestos: causando separaciones o modificando la distribución de la fibra en el material. Los métodos encontrados en la literatura como ejemplo para causar daños controlados son: acumular masa en un punto del elemento con el fin de modificar su estructura, lo que causará una alteración al momento de realizar un análisis de resonancia. Otro método es provocar un daño en la parte externa del material, como cortes o perforaciones en alguna zona del material, que permita modificar la estructura o la continuidad del elemento. Otro método es aplicar un impacto de baja velocidad en una de las superficies del elemento, lo cual causa daños internos, principalmente en el material base, modificando las propiedades del material. El último método es causar una delaminación mecánica en el material con la inclusión de una placa delgada como un shim metálico o teflón que dificulte la unión de dos capas del material. El método seleccionado para causar un daño controlado en el material fue la inclusión de una lámina de doble capa de teflón de diferentes tamaños, como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4 Daño controlado, delaminación con teflón insertada entre las capas durante la construcción del elemento tipo placa.

4.3.1. Elementos para ensayos de transmisión.

Para la realización de los ensayos de transmisión, se construyeron elementos en material reforzado con fibra de carbono como los que se mencionan en la Tabla 4.1, induciendo daños con láminas de teflón como se describen a continuación. El primer elemento es tipo placa con un espesor de 3mm, al cual se le indujo una delaminación de doble capa de 10x10mm a una distancia aproximada de 75mm del extremo y una profundidad de aproximada de 75% del espesor de la placa, lo que equivale a diez capas de material, donde el ancho de la lámina de teflón no se ve afectada durante el procedimiento de enrollado de la tela. Un esquema del elemento con la ubicación del daño se muestra en la Figura 4.5.

Para el segundo elemento se construyó una viga tipo riel como las que se mencionan en la Tabla 4.1. La prueba se realizó a través del espesor de 15mm. En el riel se insertaron tres delaminaciones perpendiculares al espesor de 15mm, con un tamaño de 10x10mm a lo largo de 200mm del riel,

variando la cantidad de capas del teflón entre sencilla, doble y triple, ubicadas a aproximadamente a 75% del espesor del riel. Un esquema del elemento se muestra en la Figura 4.6.

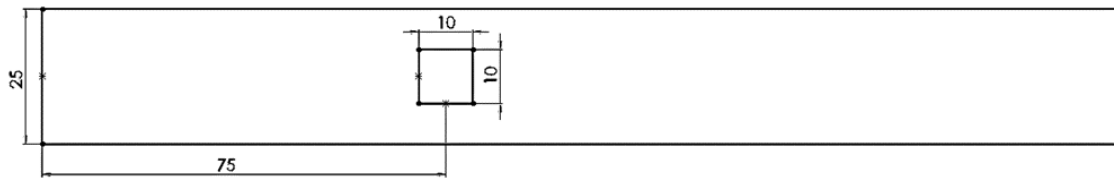


Figura 4.5 Placa de 3mm con daño controlado, con lámina de teflón.

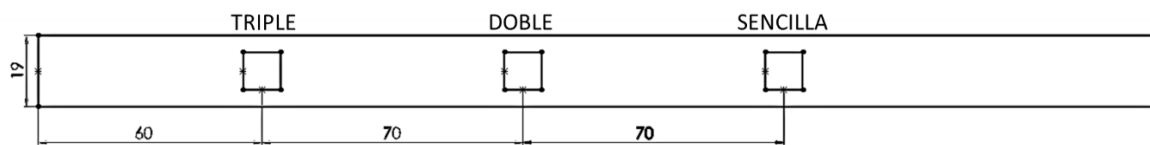


Figura 4.6 Riel con espesor de 15mm, con delaminaciones sencilla, doble y triple capa de teflón, de 10x10mm.

El tercer elemento es un riel tipo viga, en el cual la prueba se realizó en el espesor de 19mm. Se ubicaron cuatro delaminaciones de 5x10mm, 10x10mm, 15x10mm y 20x10mm espaciadas a lo largo de 200mm desde uno de los extremos y perpendiculares al espesor del riel, ubicadas a 80% del espesor aproximadamente. El esquema del riel construido se muestra en la Figura 4.7.

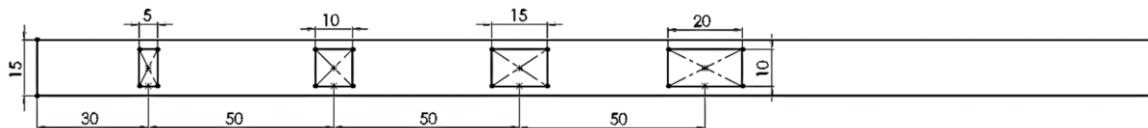


Figura 4.7 Riel de 19mm de espesor, con delaminaciones de doble capa, con anchos de 5mm, 10mm, 15mm y 20mm.

4.3.2. Elementos para ensayo de resonancia.

El ensayo de resonancia primero se realizó en un elemento construido en un material conocido cuyas propiedades están reportadas en la literatura. El material seleccionado fue una lámina de aluminio de referencia 6061T6, de 130mm de largo, 40mm de ancho y 1mm de espesor. La geometría y las propiedades de la placa de aluminio se muestran en la Tabla 4.2. Además de la placa para el dominio de la técnica, se construyeron placas de aluminio con la misma geometría de la Tabla 4.2 pero con daños inducidos en las partes laterales como se muestra en la Figura 4.8, donde la distancia D se varió entre 15, 25, 45 y 55mm.

Tabla 4.2 Geometría y propiedades de la placa de aluminio para dominio de la técnica de análisis modal.

Material	Aluminio 6061T6	
ELEMENTO	SIMBOLO	VALOR
Largo	L	130 mm
Ancho	B	40 mm
Espesor	h	1 mm
Módulo de elasticidad	E	68,9 Gpa
Densidad	ρ	2700 Kg/m ³

Los elementos contruidos en material reforzado en fibra de carbono son elementos tipo placa como se mencionan en la Tabla 4.1, a los cuales se les aplica un daño controlado que consiste en una lámina de teflón doble de 10x10mm ubicado a 75mm del extremo, a una profundidad aproximada de diez capas, como se muestra en la Figura 4.9 y Figura 4.10.

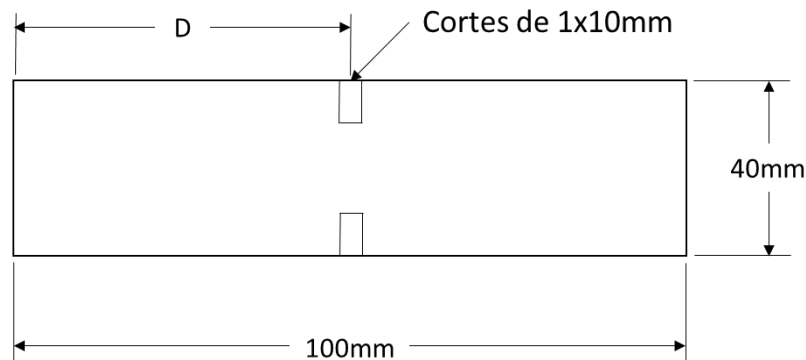


Figura 4.8 Placa en aluminio con daño inducido.

Para garantizar que los resultados no fueran afectados por el procedimiento de construcción de la placa, se construyó en un solo procedimiento una placa, induciendo un daño en un lado y dejando un lado sano, en una sola placa de 295mm, como se muestra en la Figura 4.10. Para el procedimiento de análisis de resonancia de cada placa individualmente, se empotró la placa justo por la mitad (ver líneas punteadas en la Figura 4.10.)

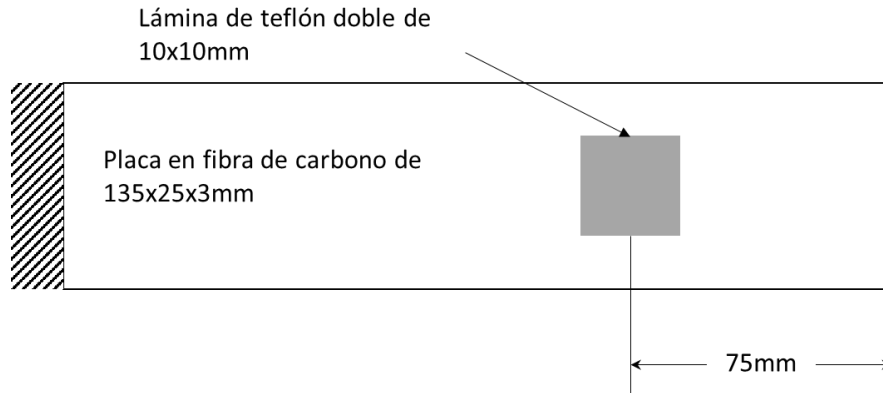


Figura 4.9 Placa con daño controlado empotrada para prueba de resonancia.

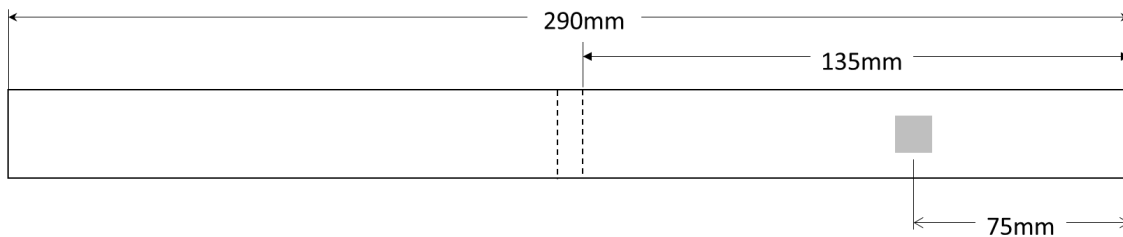


Figura 4.10 Placa general con un lado sano y un lado con defecto.

4.3. Ensayos no destructivos para detección de defectos.

Los ensayos no destructivos seleccionados para la evaluación de los elementos construidos en fibra de carbono son el método de ultrasonido y resonancia, los cuales fueron mencionados en secciones previas.

4.3.1. Ensayo de Transmisión sin contacto con Incidencia Normal.

El objetivo de aplicar el ensayo de transmisión en las probetas construidas en materiales reforzados con fibra de carbono que tienen un daño controlado es comprobar si se presenta un cambio en la intensidad de la señal cuando atraviese la zona del daño, donde el cambio de impedancia entre el material y el daño modifica la señal a la salida del material.

4.3.1.1. Montaje para ensayo de transmisión.

El montaje para realizar el ensayo de transmisión consiste en dos transductores acoplados en aire, uno de ellos como emisor y el otro como receptor con frecuencias centradas a 250, 400 y 750 KHz. Los transductores se conectaron a un pulse-receiver (Olympus 5077PR onda cuadrada). Las señales fueron digitalizadas en un osciloscopio (Tektronix TDS 2014C, 100MHz, 2GS/s) y enviadas a un computador para el procesamiento de los datos obtenidos.

4.3.1.2. *Procedimiento Ensayo de Transmisión.*

El ensayo se realizó haciendo incidir ondas de ultrasonido con el transductor emisor de manera normal a la superficie del elemento como se muestra en la Figura 4.11. A su vez se capturaron las ondas que atraviesan el elemento con el transductor receptor, midiendo la intensidad de la señal recibida y el tiempo que tarda la onda en viajar de un transductor al otro. Primero se halló la velocidad de transmisión del sonido en el material. Con este dato se trazó la curva de longitud de onda Vs frecuencia, para evaluar si las frecuencias centrales de los transductores utilizados tienen la capacidad de identificar el tamaño de los daños. Para la identificación de daños, las mediciones se realizaron a lo largo de los elementos, midiendo en diferentes puntos ubicados por un mecanismo XY el cual permite controlar la distancia de desplazamiento. El primer ensayo de transmisión se realizó para el elemento placa que se muestra en la Figura 4.2, con las características de daño que se muestran en la Figura 4.5. Se realizó el ensayo de transmisión ubicando los transductores para que incidieran de manera normal a la cara más ancha de la placa. La prueba se realizó con un intervalo de muestreo de 2 mm por el lado más largo de la placa. El segundo ensayo se realizó en un elemento tipo riel de 15 mm de espesor, como se muestra en la Figura 4.3, con el daño inducido que se muestra en la Figura 4.6, la dirección de incidencia de las ondas se realizó de manera paralela al espesor de 15 mm, con un intervalo de muestreo de 2mm por el lado más largo del riel. El tercer ensayo se realizó en un elemento tipo riel con daño inducido como se muestra en la Figura 4.7 incidiendo de manera normal, paralelos al espesor de 19mm también muestreando cada 2mm por el lado más largo del riel.

4.3.1.3. *Procesamiento de Datos.*

El procesamiento de los datos consiste en comparar la diferencia entre la señal recibida y la señal emitida. La primera diferencia apreciable es el tiempo que tarda la onda en viajar desde el emisor hasta llegar al receptor. Este tiempo depende de la velocidad de transmisión del sonido en los elementos que se encuentren entre los dos transductores. El segundo ítem a evaluar es la intensidad de la señal en función de la frecuencia, la cual varía con la impedancia de los materiales que se van a evaluar. Para materiales con alta impedancia, el pulser-receiver cuenta con la posibilidad de aumentar la ganancia de la señal permitiendo captar bajas intensidades. Una gráfica de los datos obtenidos de la prueba de transmisión es como se muestra en la Figura 4.12. Al principio de la gráfica, cuando el tiempo es igual a cero se muestra un pico el cual corresponde al acoplamiento eléctrico de la excitación en el canal de medida. Esto indica por tanto, el momento en el que es generada la señal. Después de este punto no se aprecia una amplitud de señal hasta los $11,5 \times 10^{-10}$ segundos, excepto por las pequeñas amplitudes atribuidas a ruido. Posterior a este punto se ve un pico que se eleva hasta 0.06 voltios, el cual se refiere a la señal recibida por el transductor receptor. Para el análisis, mediciones hechas en diferentes puntos consecutivos a lo largo del riel o la placa, y representadas en un B-scan, son presentadas.

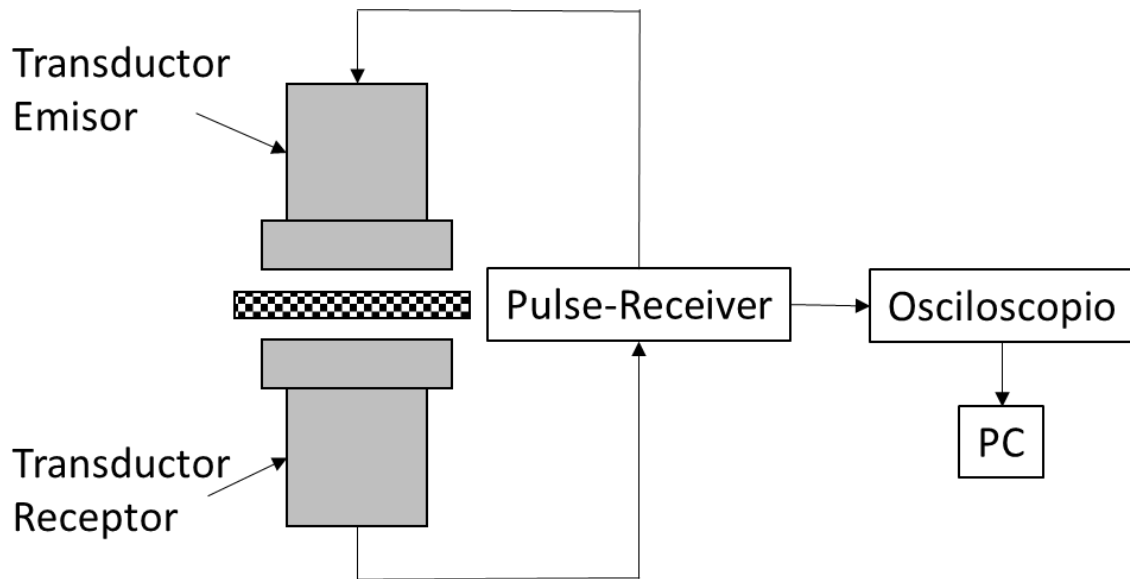


Figura 4.11. Montaje para ensayo de transmisión.

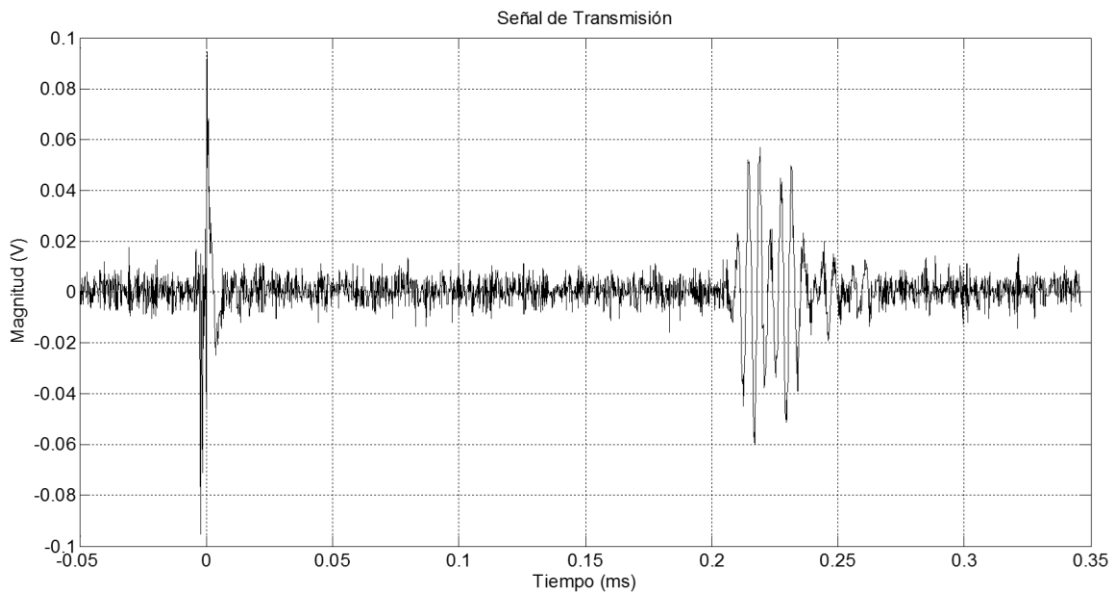


Figura 4.12 Respuesta ensayo de transmisión en dominio temporal riel espesor de 15mm.

4.3.2. Ensayo de Resonancia.

El objetivo del ensayo de resonancia es verificar la influencia que tiene un defecto en las frecuencias propias del material. Según la ecuación 26, un cambio debido a un daño o inclusión de un material extraño que pueda afectar la masa, la geometría o la rigidez del elemento manteniendo sus condiciones de borde, causaría un cambio en sus frecuencias propias. Según Abdo et al. [25], la posición del defecto afecta más una frecuencia propia en particular que otra debido a la forma del modo.

4.3.2.1. *Análisis Modal Experimental.*

Para obtener las frecuencias propias del elemento de manera experimental, el procedimiento se realizó como se ve en la Figura 3.3 donde primero se hallan experimentalmente las propiedades modales del elemento y con estos valores se procede a comprobar con las propiedades modales teóricas. El análisis modal experimental se basa en obtener las frecuencias propias, el amortiguamiento y las formas de los modos del elemento a evaluar en un procedimiento donde se induce una vibración a un elemento y se mide su respuesta. Para la realización de esta prueba se tienen en cuenta dos consideraciones, la primera es que la medida en la respuesta del elemento presentará un pico cuando la frecuencia de la excitación coincide con la frecuencia propia del elemento a evaluar. La segunda consideración es que la fase de la respuesta tendrá un cambio de 180° cuando la frecuencia de la fuerza de excitación pase por la frecuencia propia del elemento a evaluar [24] como se muestra en la Figura 4.13.

Las resonancias de un elemento son determinadas por sus propiedades internas y por las condiciones de frontera según el montaje del ensayo. Cualquier variación en las condiciones del montaje, o en las propiedades del elemento a evaluar, cambiará las frecuencias donde se presente la resonancia y por lo tanto las frecuencias propias del elemento. El conjunto de propiedades como la frecuencia de resonancia, el amortiguamiento del elemento y la forma que adquiere el elemento cuando se mueve a la frecuencia de resonancia son conocidos como modos [19].

4.3.2.2. *Montaje para ensayo de resonancia.*

El montaje experimental consistió en instalar la placa en cantiléver, empotrando un extremo y dejando libre el otro, excitándolo y permitiéndole moverse libremente en una sola dirección. Los elementos básicos para la realización del ensayo modal son: una fuente de excitación, un medidor de las vibraciones de respuesta del elemento, un amplificador o acondicionador de señales y un analizador de señales [24].

El montaje general para el ensayo de resonancia consta de las opciones como se muestran en la Figura 4.14 y en la Figura 4.15, donde se cuenta con un elemento de medición de desplazamiento (sensor fotónico MTI-2100, MTI Instruments) o velocidades (vibrómetro laser; controlador Polytec, OFV-5000, cabezal Polytec OFV-505). Para imprimir energía en el componente con material compuesto se utilizaron dos técnicas: una de impulso por impacto (Martillo de impacto Dynapulse 5850B, Dytran instruments) y otra por barrido de frecuencia (Shaker Modal Shop 2025E; controlador Modal Shop 2100E21). La señal del barrido de frecuencia se aplicó a través de un generador de señales (Tektronix AFG3022C, 250MS/s, 25MHz).

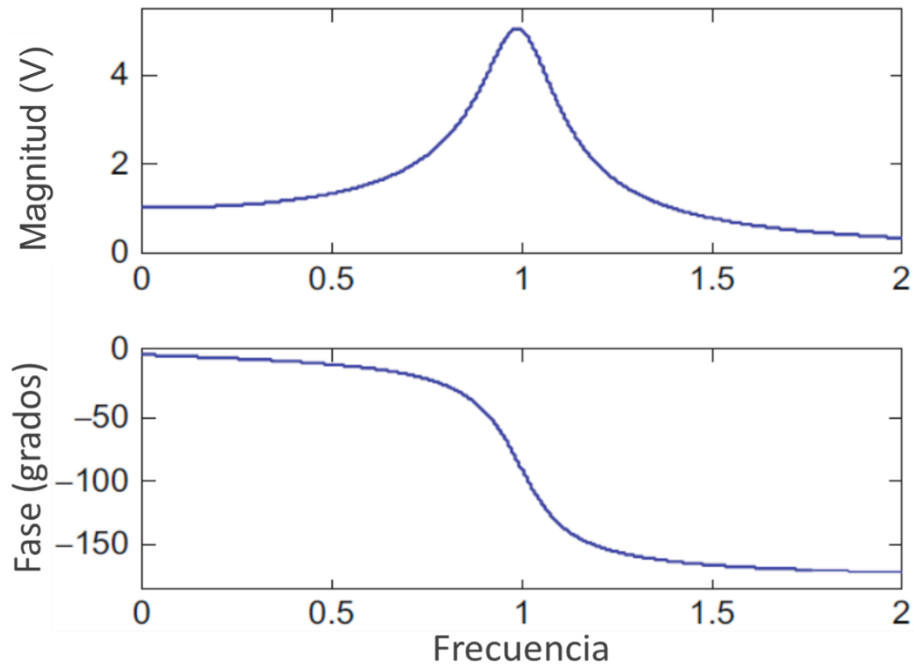


Figura 4.13 Función de respuesta en frecuencia alrededor de una frecuencia de resonancia, Magnitud (V) y Fase (grados).

4.3.2.3. Procedimiento para el ensayo de resonancia.

Previo a aplicar el método de análisis modal a elementos contruidos en fibra de carbono, con el objetivo de aprender a dominar la técnica, primero se aplica el procedimiento en un elemento construido en un material conocido que tenga los resultados reportados en la literatura o que se puedan comprobar de manera analítica y/o numérica para comparar con los resultados experimentales. El material seleccionado fue el aluminio en forma de lámina, al cual se le realizó el análisis modal de forma analítica, de forma numérica y de forma experimental y se compararon sus resultados.

Para el cálculo numérico de las frecuencias propias del elemento se utiliza la ayuda de un software llamado Ansys Workbench 16.1, donde se dibuja la geometría como un elemento tipo placa y se le seleccionan las propiedades del aluminio que tiene la galería del software. El software tiene una herramienta que permite hacer el análisis modal de un elemento. Como un método para verificar que el procedimiento en el software es congruente, se realiza un refinamiento de malla en dos ocasiones, donde se vuelven a mirar los resultados obtenidos, si los resultados convergen a un valor se puede considerar que los resultados no son influidos por la densidad de malla.

Posteriormente se realiza el análisis modal experimental con el montaje propuesto en la Figura 4.15, donde la excitación se realizó con el shaker. El método de excitación de la placa se realizó con barridos de frecuencia (Chirp) con el que se imprimió energía a la placa a diferentes frecuencias. Las medidas de las amplitudes de respuesta de la placa se tomaron con el sensor fotónico. Después de tener los resultados analítico, numérico y experimental, se compararon los resultados para verificar si el procedimiento experimental es confiable para la obtención de las frecuencias propias del elemento.

Posterior a tener definido el procedimiento experimental, se le indujeron daños en diferentes posiciones a la placa de aluminio, variando D en la Figura 4.8 y se hallaron las frecuencias propias para verificar la influencia que tienen los daños en el cambio de sus frecuencias propias.

Teniendo resultados satisfactorios en un material conocido, se realizaron pruebas en muestras tipo placa en material reforzado como los mencionados en la Tabla 4.1, construyendo elementos con una mitad en buen estado y la otra mitad con daño controlado (Figura 4.10). Se construyeron en total seis elementos a los cuales se les aplicó el análisis modal y se realizó un análisis de varianza para verificar la repetitividad de los resultados, verificando si hay diferencias entre las propiedades modales con y sin defecto.

4.3.2.4. *Procesamiento de datos.*

El procedimiento para la obtención de las frecuencias propias de la placa de aluminio consistió en medir las amplitudes que se presentaron en tres puntos: uno cercano al extremo libre, uno cercano a la zona central y uno sobre la base del empotramiento. Las amplitudes medidas en la zona del empotramiento fueron utilizadas para describir el comportamiento de la excitación, donde ya se tienen en cuenta la amplificación del shaker, la adición de masa del actuador y la adición de masa de la base del empotramiento puesto en la punta del shaker. Las amplitudes del centro y del extremo, se compararon con las amplitudes en la base del empotramiento que era la referencia. A todos los datos se les aplicó la transformada rápida de Fourier para pasarlos al dominio frecuencial, se compararon los datos de la zona central y extrema con los de la base para hallar la función de respuesta en frecuencia (FRF por sus siglas en ingles. Una vez obtenidas las frecuencias de resonancia, se hizo vibrar la base a las frecuencias halladas y se midieron las amplitudes en diferentes puntos espaciados de manera equidistante. Con las amplitudes obtenidas se hallaron las formas modales. Para hallar el factor de amortiguamiento ξ , se encontró con el procedimiento de ajustar la frecuencia de resonancia obtenida con la respuesta de un sistema de dos grados de libertad.

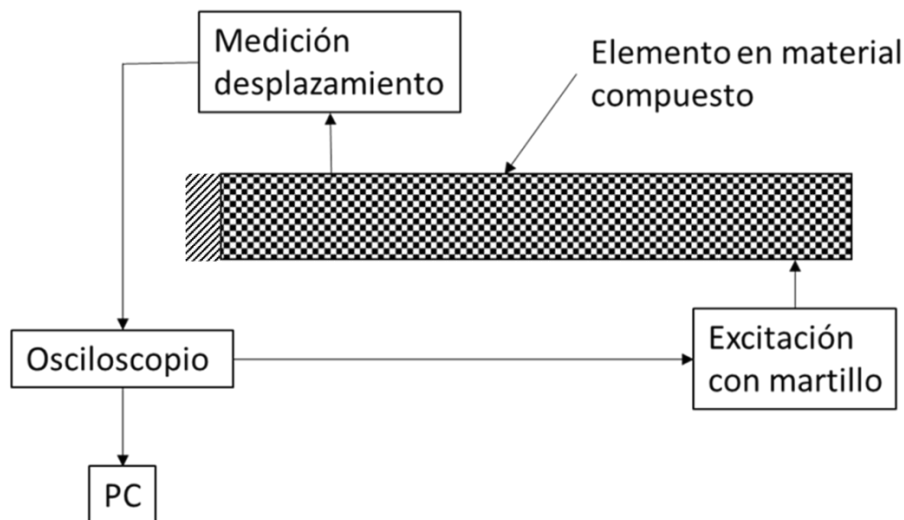


Figura 4.14 Montaje para análisis de resonancia excitado con Martillo.

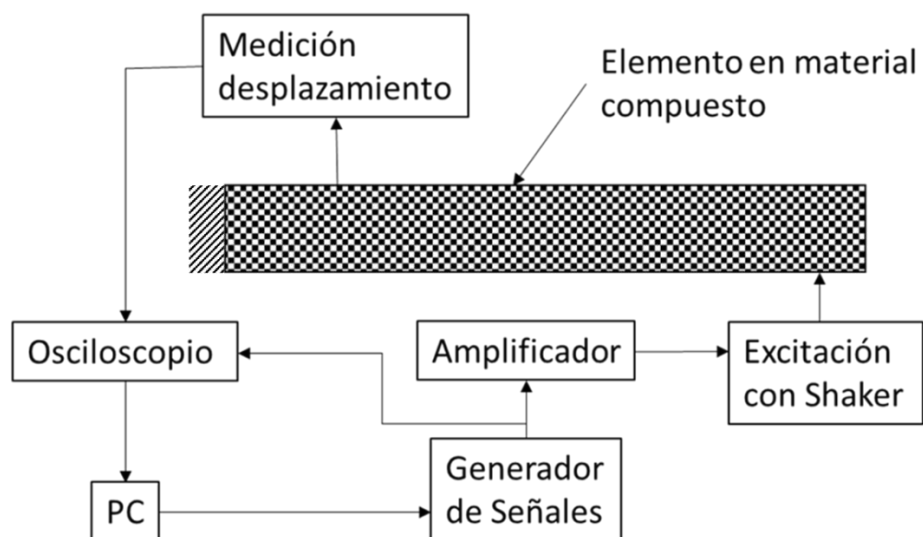


Figura 4.15 Montaje para análisis de resonancia excitado con Shaker.

5. Resultados.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con los montajes que se mencionaron en la sección anterior. Se incluyen discusiones y conclusiones previas. En todas las pruebas de análisis modal sólo se analizaron las respuestas flexurales, es decir, que los ensayos se realizaron sobre una línea central a lo largo del elemento, no siendo posible detectar comportamientos torsionales.

Las pruebas de ultrasonido en materiales reforzados suelen ser poco efectivas debido a su modo de construcción en capas. Estas capas causan una alta atenuación de la onda transmitida. Sin embargo, con los transductores utilizados fue posible lograr resultados satisfactorios aumentando la ganancia en la recepción de la señal en 60dB, lo cual equivale a decir que la señal pierde casi tres órdenes de magnitud mientras pasa a través del elemento.

5.1. Procedimiento para Detección de Defectos con Ensayo de Transmisión.

Antes de realizar el ensayo de transmisión en los elementos de material fibrorreforzado, se debe definir si los transductores seleccionados tienen la capacidad para identificar los defectos con los tamaños construidos. Con este objetivo se midió la diferencia de tiempo que tarda la señal en llegar desde el transductor emisor al receptor en las dos situaciones: con muestra y sin muestra. Con esta diferencia y asumiendo una velocidad de transmisión del sonido en el aire de 343m/s, se halló la velocidad de transmisión del sonido dentro del elemento.

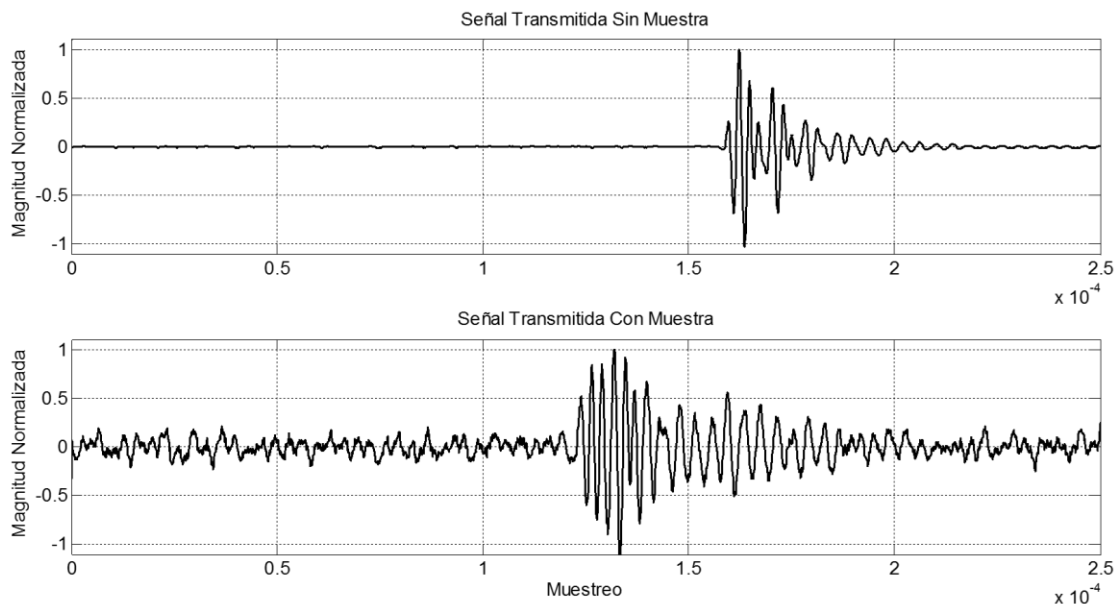


Figura 5.1 Respuesta normalizada de la señal transmitida con y sin muestra en fibra de carbono (riel de 15mm).

En la Figura 5.1, se muestran las señales transmitidas entre los transductores sin elemento (parte superior) y con elemento (parte inferior), para el riel con espesor de 15mm. Se puede apreciar una diferencia de tiempo de respuesta entre las dos señales. La señal que contiene el elemento en fibra de carbono tiene un adelanto en la respuesta, lo que indica que la velocidad de transmisión del sonido en el elemento de fibra es mayor que la velocidad de transmisión del sonido en el aire. Con las diferencias entre los tiempos de respuesta, se puede identificar la velocidad de transmisión dentro del elemento, en el sentido de incidencia de las ondas, la cual se asume como constante en todo el espesor.

La forma como se calculó la velocidad de transmisión dentro de las muestras con la diferencia entre el tiempo de las señales fue de la forma:

$$\Delta t = t_1 - t_2; \text{ donde: } t_1 = \frac{d}{C_a} \text{ y } t_2 = t_{aire} + t_{muestra} = \frac{d-h}{C_a} + \frac{h}{C_m}$$

Donde Δt es la diferencia entre los tiempos de respuesta que se halla experimentalmente como se muestra en la Figura 5.1, t_1 es el tiempo de los transductores sin muestra, t_2 es el tiempo entre los transductores con muestra, d es la distancia entre los transductores, h es el espesor de la muestra, C_a es la velocidad de transmisión del sonido en el aire, C_m es la velocidad de transmisión del sonido en la muestra.

Reemplazando los valores en la ecuación general y despejando C_m se obtiene:

$$C_m = \frac{C_a h}{h - \Delta t C_a}$$

Esta es la manera como se hallan las velocidades de transmisión dentro de las muestras, a continuación, se muestran las velocidades obtenidas:

$$C_1 = 896.5 \text{ m/s}$$

$$C_2 = 1.574 \text{ m/s}$$

$$C_3 = 2.264 \text{ m/s}$$

Donde: C_1 es la velocidad de transmisión en la placa de 3mm, C_2 es la velocidad de transmisión en el riel con espesor de 15mm y C_3 es la velocidad de transmisión en el riel con espesor de 19mm. Las velocidades de transmisión son diferentes en cada elemento, lo cual se debe a la distribución de la tela en cada uno de los elementos.

Con los datos de velocidad de transmisión en los elementos, se procedió a encontrar la longitud de onda para un rango de frecuencias entre 100kHz y 400kHz, teniendo en cuenta que $C = \lambda \cdot f$; siendo C la velocidad de transmisión de sonido, λ la longitud de onda y f la frecuencia.

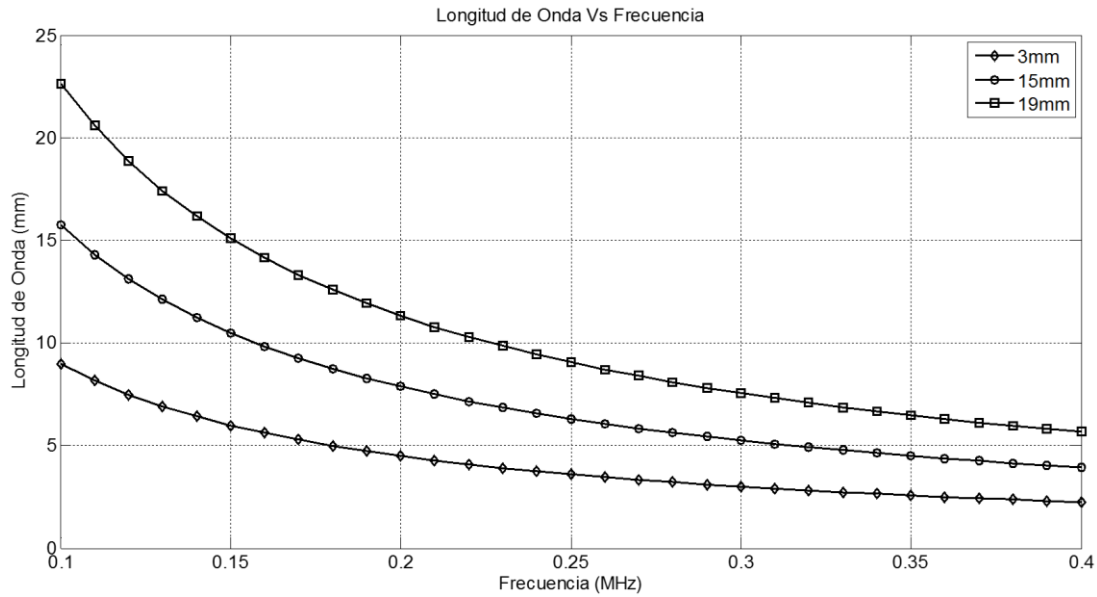


Figura 5.2 Longitud de onda para elementos construidos en fibra de carbono, para un rango de frecuencias de 100kHz a 400kHz

En la Figura 5.2, se muestran curvas donde se relacionan la longitud de onda y la frecuencia de incidencia de los transductores, modificados por la velocidad de transmisión del sonido dentro del material, para los tres espesores que fueron analizados, las longitudes de onda se muestran para el rango de frecuencias mencionado anteriormente. Se puede evidenciar que la velocidad de transmisión del sonido es afectada por el espesor del elemento. Como una aproximación para hallar el mínimo tamaño de defecto que puede ser detectado, se asume una dependencia hacia la longitud de onda de la forma: $\lambda/2$ [17]. Con estos datos, se puede inferir que los transductores con los que se cuenta están en la capacidad de identificar los daños en los tamaños construidos.

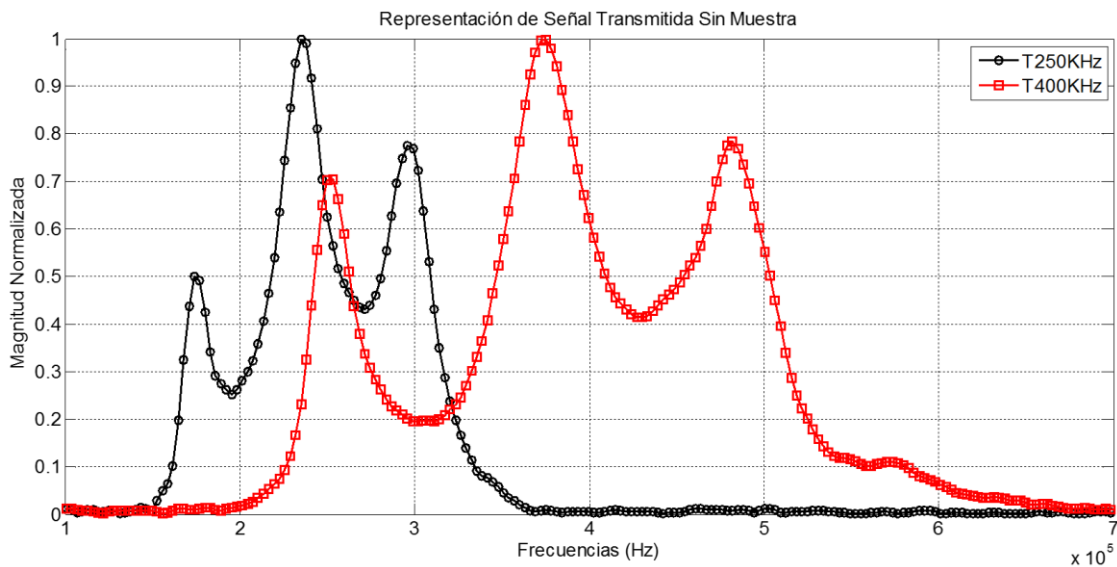


Figura 5.3 Representación en frecuencia de señal transmitida entre transductores con frecuencias centrales de 250 kHz y 400 kHz, sin muestra

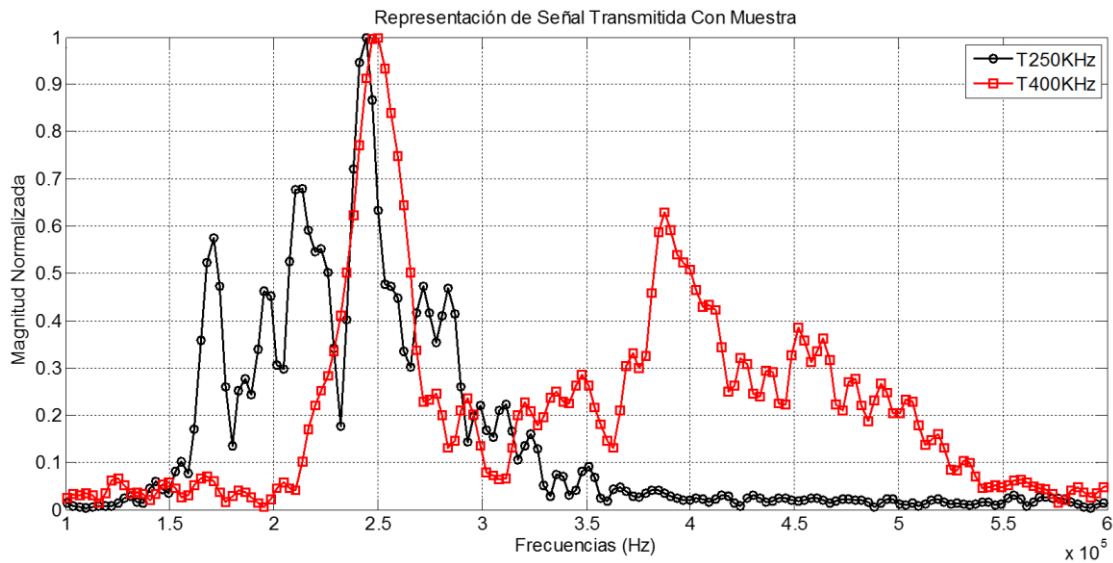


Figura 5.4 Representación en frecuencia de señal transmitida entre transductores, con muestra de 15mm de espesor.

En la Figura 5.3, se puede apreciar la representación de las señales transmitidas entre los dos pares de transductores centrados a 250 KHz y 400KHz para el caso en el que no se tiene entre ellos la muestra a evaluar. A pesar de que se les da el nombre de la frecuencia a la cual están centrados, se puede ver en la Figura 5.3, que los transductores funcionan en un rango de frecuencias. Para el caso del juego de transductores de 250kHz se evidencia un rango de operación entre: 160kHz y 320kHz. Para el caso del juego de transductores de 400kHz su rango de operación está entre: 240kHz y 500kHz.

En la Figura 5.4, se puede apreciar las mismas señales transmitidas para el mismo par de juegos de transductores para el caso donde se tiene el riel de 15mm de espesor entre ellos. Se puede notar que la frecuencia a la que se presenta la mayor amplitud es 250KHz para ambos juegos de transductores. La respuesta obtenida que se muestra en la Figura 5.4, se presentó de la misma manera para los tres espesores a evaluar.

Basado en las señales transmitidas de cada juego de transductores se pudo ver que para los transductores centrados en 400KHz la relación señal a ruido en el dominio temporal es más baja. En vista de ello se decidió dar prioridad al juego de transductores centrado en 250KHz.

5.1.1. Detección de Defectos en Placas de 3mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido.

La respuesta de la onda en el dominio temporal se puede observar en la Figura 5.5, donde se muestra una respuesta en una zona donde no hay daño (superior) y otra en una zona donde se encuentra el daño (inferior). Se puede apreciar como en la zona donde se encuentra el daño la intensidad de la señal se atenúa, debido a un cambio de impedancia al interior del elemento por la presencia de un elemento extraño o una delgada separación de las capas del material. Para analizar los resultados de manera general se utilizó un B-Scan, el cual compara los datos obtenidos mostrando en el eje x, los datos de la distancia a lo largo de la placa, en el eje y la intensidad de la señal medida en dB. Los datos se muestran al pico de máxima amplitud que se vio en la Figura 5.4.

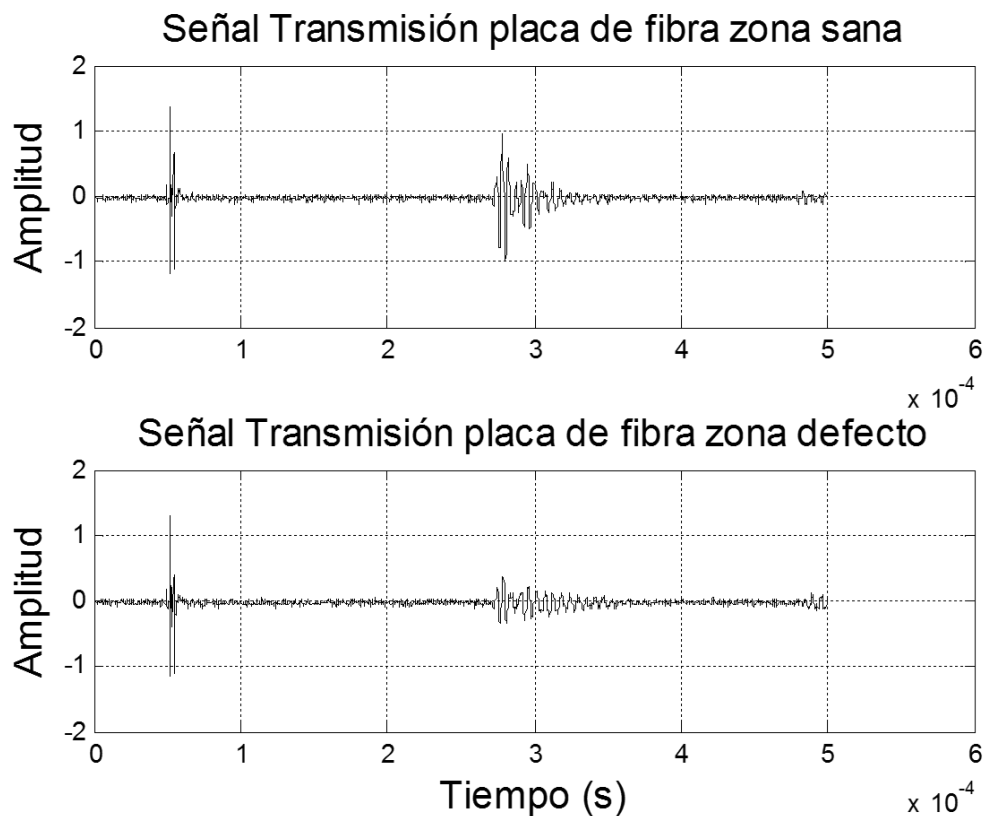


Figura 5.5 Resultado prueba de transmisión en placa comparando zona sin daño (parte superior) y placa con daño (parte inferior).

En la imagen de la Figura 5.6 se puede apreciar una disminución en la intensidad de la señal de 20 dB, que se puede distinguir a una distancia de 70mm. Esto se refiere a la pérdida de amplitud en la señal que atraviesa la placa como se mencionó anteriormente y se mostró en la Figura 5.5. Se puede asociar esta disminución a la delaminación inducida. En la parte inferior de la Figura 5.6, se muestra un B-scan de la señal, en la zona donde se ubicó el defecto se ve una diferencia en la continuidad de

la intensidad de la señal representada con colores, la discontinuidad es debida a la caída de la magnitud de la señal como se muestra en la zona central de la Figura 5.6.

5.1.2. Detección de Defectos en Riel de 15mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido.

Los rieles en material reforzado tienen la misma cantidad porcentual de fibra de carbono con respecto a la resina, pero con un espesor mayor y una distribución diferente de la tela. Se requiere identificar si la prueba de transmisión es lo suficientemente capaz de atravesar el espesor del riel e identificar daños en su interior y si el tamaño del daño controlado puede ser detectado experimentalmente por la prueba, ya que la lámina de teflón utilizada es muy delgada y el área del defecto es más pequeña que el área de la cara del transductor.

Para poder resolver estas inquietudes se construyó un elemento tipo riel como el mencionado en la Tabla 4.1, al cual se le aplicó un daño controlado que se muestra en la Figura 4.6. A este elemento se le realizó un ensayo de transmisión con juegos de transductores de 250 kHz y 400 kHz acoplados en aire. La prueba se realizó a una distancia de 240 mm del lado más largo del riel por el centro del elemento. La respuesta obtenida con el juego de transductores de 400 kHz presentó una muy baja relación señal a ruido, lo que dificultó la identificación de los defectos. Los resultados a una frecuencia de 250 kHz se muestran en la Figura 5.7.

En la Figura 5.7 se puede evidenciar una atenuación en la señal mayor a 10 dB en las distancias aproximadas de 70, 130 y 190mm, que corresponden con las posiciones donde se encuentran defectos, siendo más marcada en la primera posición donde el defecto inducido es de tres láminas de teflón. En la zona inferior de la misma figura se presenta un B-scan realizado en el elemento, donde en las zonas donde se presentan las caídas en la magnitud de la señal, se puede ver una discontinuidad en la imagen. El defecto que se encuentra a los 130mm que tiene dos capas de teflón no es tan marcado, pero se puede observar con claridad. El defecto que se encuentra a los 190mm sólo tiene una capa de teflón. El resultado obtenido en la prueba anterior se compara con la posición a la que fueron ubicados los defectos, como se muestra en la parte superior de la Figura 5.7.

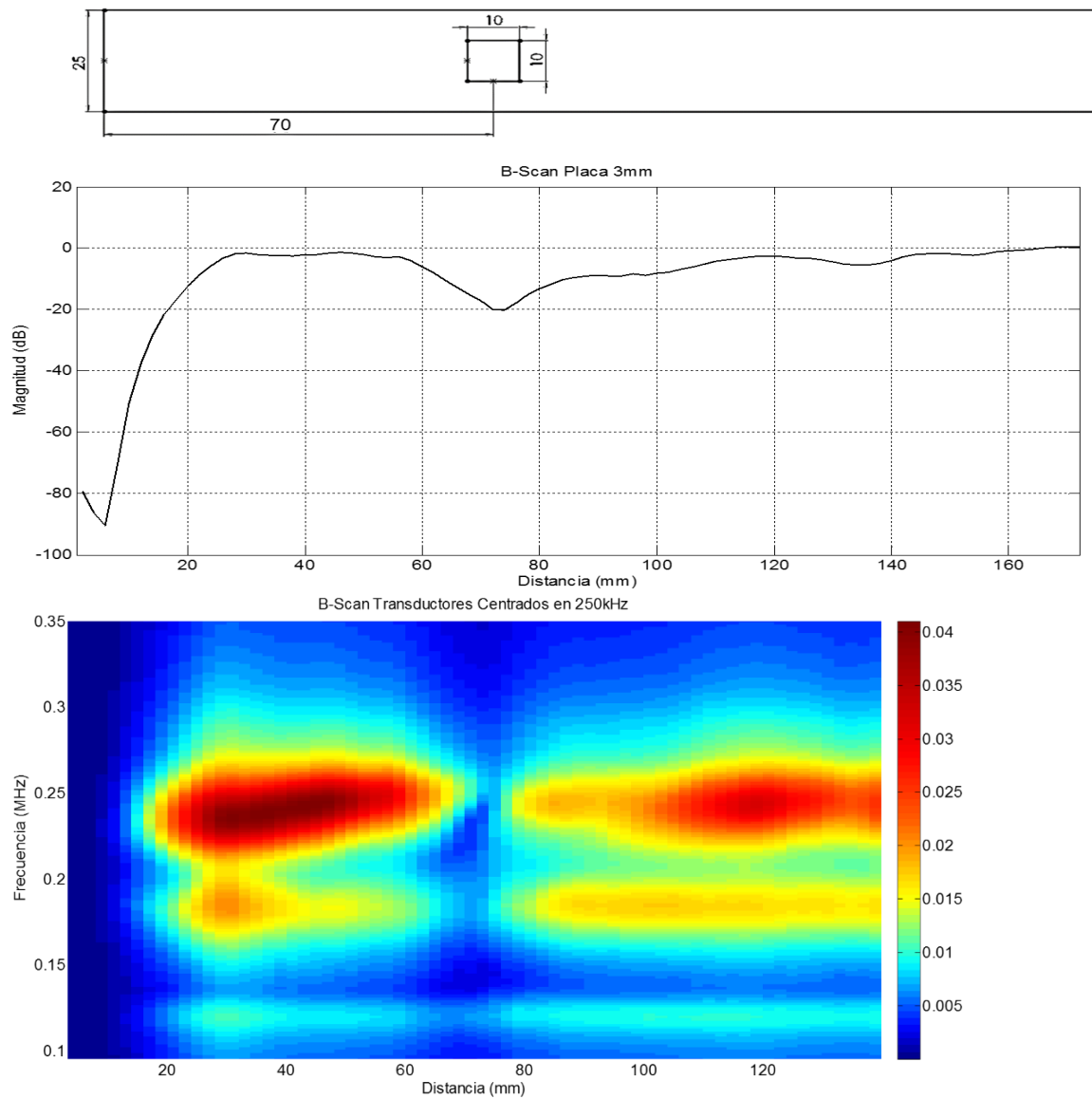


Figura 5.6 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo placa de 3mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.

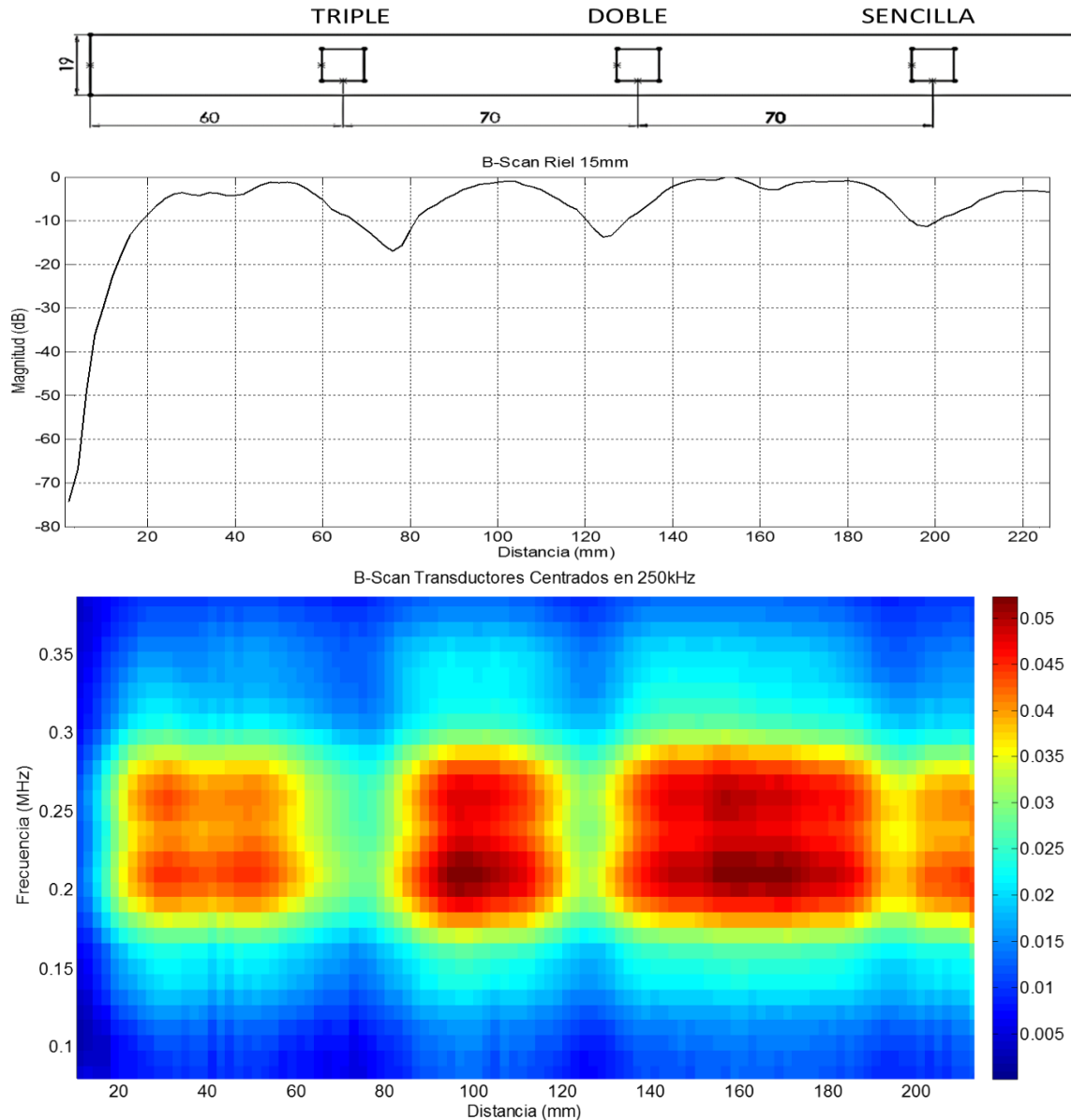


Figura 5.7 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo riel de 15 mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.

Como resultado de esta prueba, se pudo verificar que la prueba de ultrasonido con las condiciones mencionadas puede ser aplicada en elementos fibrorreforzados con las características de construcción de los rieles con un espesor de 15mm, y está en la capacidad de identificar defectos equivalentes a una capa de teflón, que fue la cantidad de láminas que permitió hacer visibles los defectos dentro de los materiales fibrorreforzados.

5.1.3. Detección de Defectos en Riel de 19mm de Espesor con Técnica de Ultrasonido.

Los transductores fueron contruïdos con materiales piezo-compuestos, con un diámetro de 20mm. La geometría del haz incidente depende de su frecuencia, de las propiedades físicas y geométricas del medio de propagación y del tamaño de la fuente. Se desea determinar qué tamaño de defecto es detectable con la prueba de transmisión con incidencia normal a la vez que se requiere saber si la prueba realizada esta en la capacidad de transmitir en el mismo elemento, pero a una profundidad de 19mm. Para dar respuesta a esta inquietud, se planteó una prueba donde se construyó un riel reforzado, induciendo defectos de diferente área, contruïdos como se muestra en el esquema de la Figura 4.7.

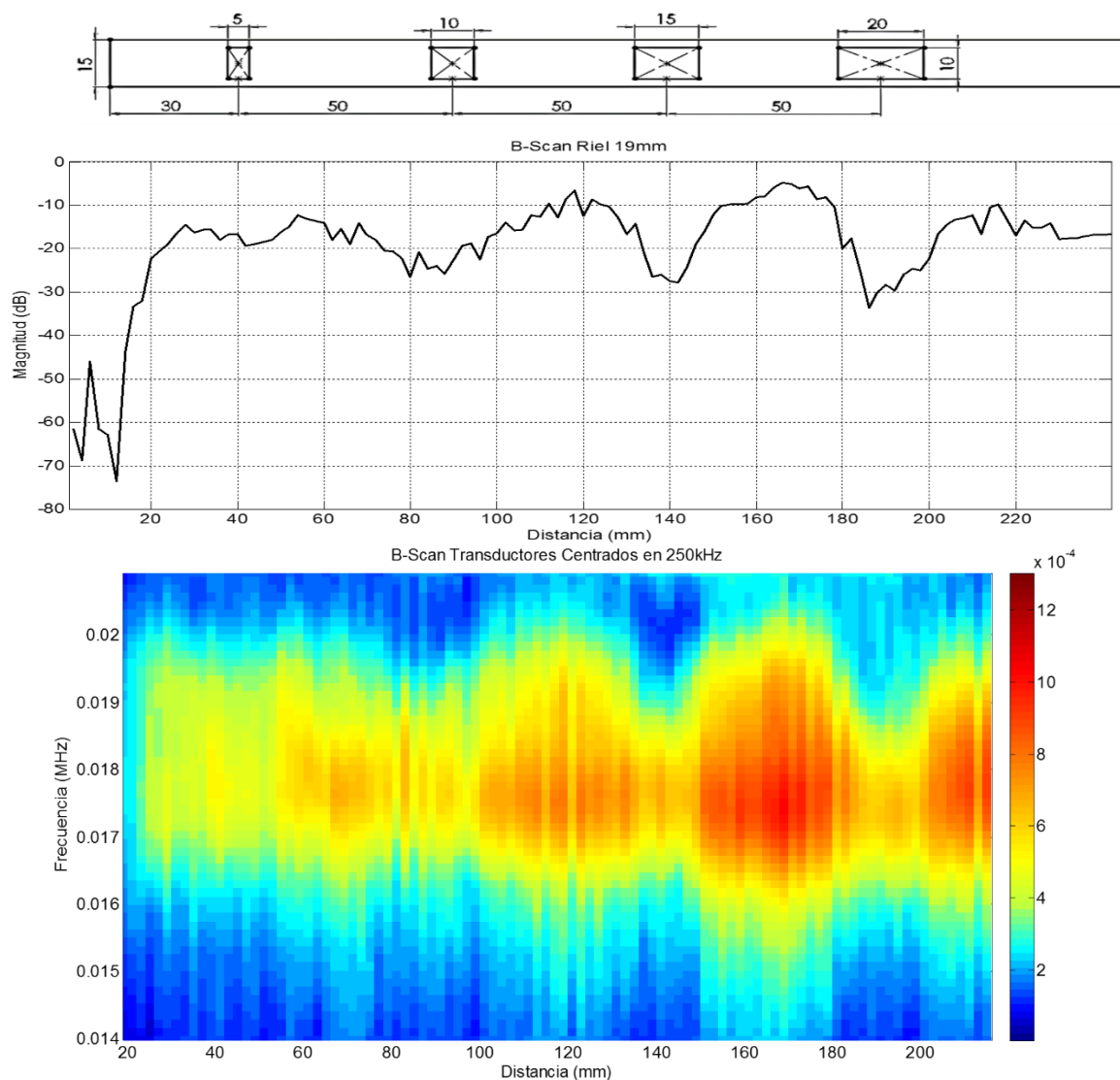


Figura 5.8 Resultados prueba de transmisión con transductores centrados en 250 kHz, sobre una muestra tipo riel de 19 mm de espesor. Arriba: Distribución espacial de los defectos inducidos. Centro: Atenuación de la señal transmitida. Abajo: B-Scan.

Los resultados de la prueba se muestran en forma de B-scan a 180 kHz en la zona central de la Figura 5.8, donde se pueden apreciar atenuaciones en las posiciones 40, 80, 140 y 190mm teniendo presente que en las posiciones de 40 y 80mm las atenuaciones se presentan cercanas al ruido de la señal, esto hace que la imagen de las frecuencias del B-scan mostrada en la zona inferior de la Figura 5.8, donde las discontinuidades no son muy marcadas en las posiciones mencionadas y en general el ruido es predominante a lo largo de la imagen lo que se atribuye a que la distribución de la tela durante la construcción no es uniforme, debido a lo artesanal de la construcción. Como se esperaba, la delaminación ubicada en la posición de 40mm, que es la más angosta, es la menos apreciable, mientras que la ubicada a 190 mm, que se trata de la delaminación de 20 mm, es la más clara.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la prueba de transmisión se puede aplicar también en rieles de las características mencionadas con un espesor de 19mm. Así mismo, los defectos que estén ubicados de manera transversal a la incidencia de la onda, equivalentes a una capa doble de teflón y con una dimensión superior a 10mm x 10mm de área del defecto pueden ser detectados.

5.2. Ensayo De Resonancia Para Identificación De Defectos.

5.2.1. Ensayo en placa de aluminio.

Con los datos presentados en la Tabla 4.2 y con el uso de la teoría presentada al principio del documento, se obtuvieron los valores analíticos de las frecuencias propias de la placa de aluminio.

El método numérico se realizó como se mencionó anteriormente. El análisis de convergencia de malla para el método numérico se muestra en la Figura 5.9, donde los valores de los resultados fueron normalizados. Los valores de las frecuencias tienden a estabilizarse en un solo valor. Con este resultado se pueden aceptar como consistentes los valores numéricos obtenidos por el software para las frecuencias propias.

Los resultados del análisis modal experimental se pueden apreciar en la Figura 5.10, donde se pueden ver las respuestas temporales y en frecuencia a una excitación tipo chirp.

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA

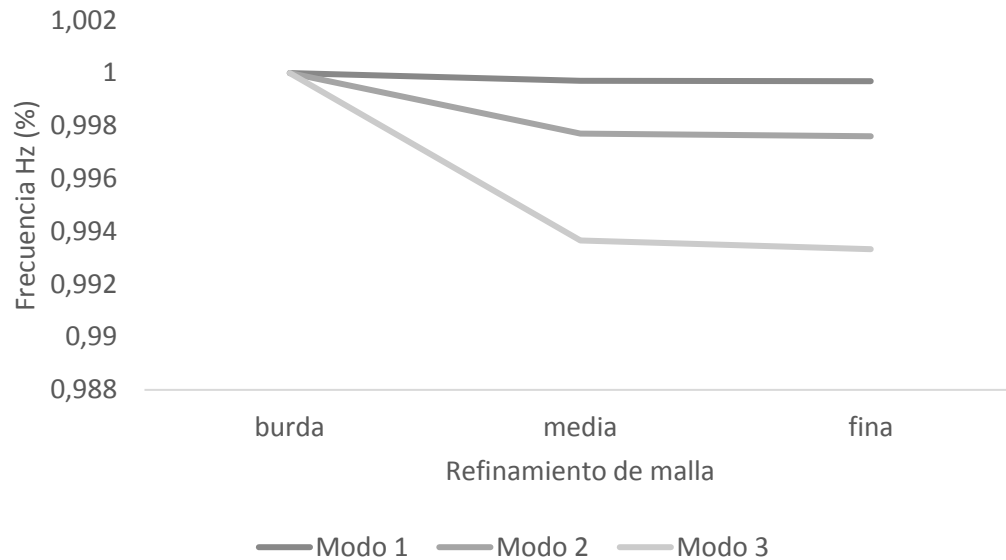


Figura 5.9 Análisis de convergencia de resultados en elementos finitos. Eje x refinamiento de malla, eje y Frecuencia normalizada, referencia malla burda.

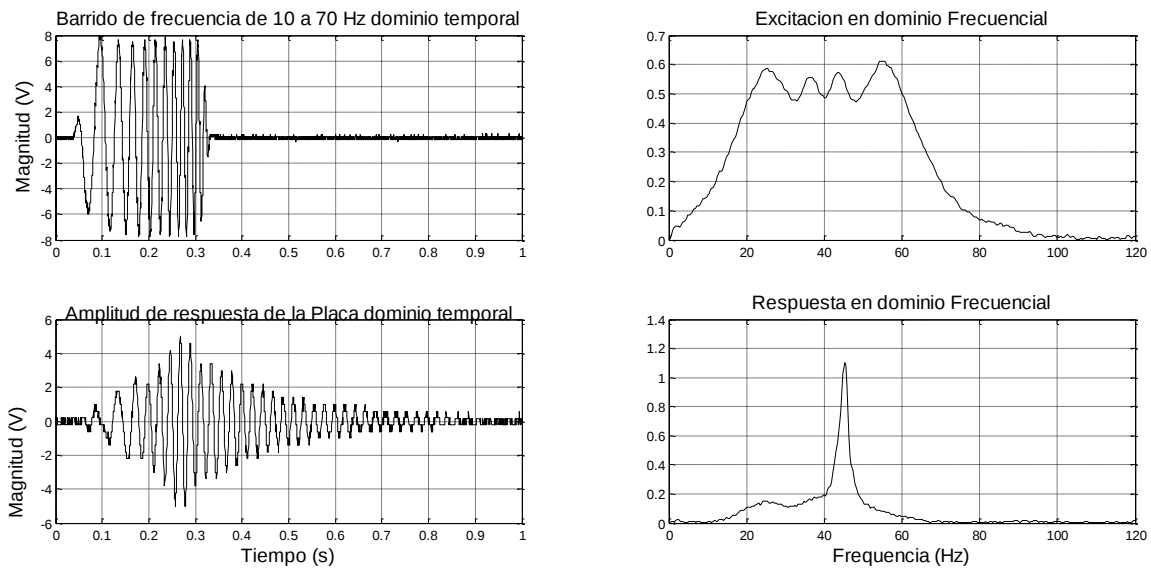


Figura 5.10 Excitación y respuesta de la placa de aluminio en dominios temporal (izq.) y frecuencial (der.).

En el dominio frecuencial (gráficas de la derecha de la Figura 5.10) el análisis se vuelve más preciso, referente a la frecuencia de resonancia. En la gráfica superior derecha, que se trata de la excitación, se puede apreciar el rango de frecuencias excitadas durante la prueba. Para lograr que la frecuencia modal sea excitada, se debe lograr que dicha frecuencia esté dentro del rango de frecuencias

excitadas, asumiendo un comportamiento lineal de la muestra. Si la respuesta no está dentro del rango, se puede interpretar el resultado como ruido o algún comportamiento no lineal, lo cual resulta improbable por el bajo nivel de excitación aplicado, entre otras razones. La respuesta en el dominio frecuencial (gráfica inferior derecha Figura 5.10) muestra un incremento de su amplitud en forma de pico en una sola frecuencia, lo que sería un primer indicativo de que se trata de la frecuencia propia del elemento.

Una vez obtenidos los datos de la excitación y la respuesta en el dominio frecuencial, se procede a obtener la función de respuesta en frecuencia. Esta permite verificar que los picos de amplitud obtenidos en la respuesta del elemento en el dominio frecuencial no son consecuencia de un pico de energía suministrado por la excitación, sino que son debidos a la respuesta misma de la muestra. La función de respuesta en frecuencia del primer barrido de frecuencia aplicado a la placa de aluminio se presenta en la Figura 5.11.

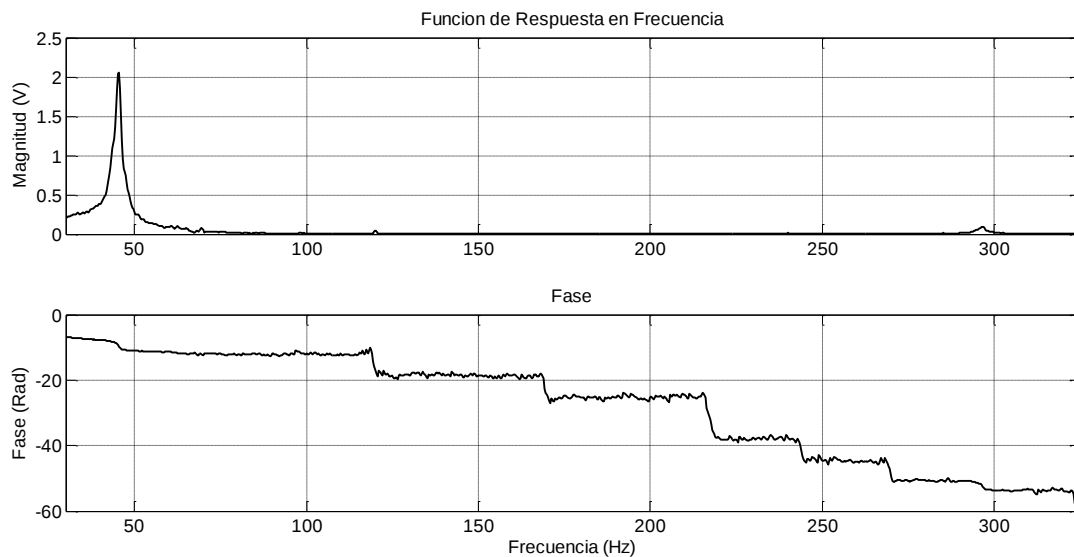


Figura 5.11 Función de respuesta en frecuencia de los primeros dos modos.

Se puede apreciar en la Figura 5.11 (arriba) los picos que se presentan en las frecuencias de 45,32 Hz y de 296,6 Hz, los cuales se refieren a las frecuencias en las que entran en resonancia la excitación y la respuesta, lo que sugiere que se trata de las dos primeras frecuencias propias de la placa de aluminio con la geometría descrita. Para poder verificar que estos picos se refieren a las dos primeras frecuencias propias del elemento, se revisó la fase de la respuesta en la gráfica inferior de la Figura 5.11 donde se encontró que en las mismas frecuencias donde se presentan los picos de resonancia, se presentan puntos de inflexión, lo que indica que se presentaron cambios de fase. Cuando se presenta un cambio de fase de π radianes, se tiene también un cambio de signo en la parte imaginaria, lo que indica que la parte imaginaria debe pasar por cero en la frecuencia propia del elemento, lo que explica el punto de inflexión. Con la revisión realizada a la respuesta, se puede concluir que efectivamente las frecuencias de 45.32Hz y 296.6, son las dos primeras frecuencias propias de la placa de aluminio en las condiciones de apoyo definidas.

En la Figura 5.12 se muestra la comparación de los resultados obtenidos entre los métodos numérico, analítico y experimental para hallar las frecuencias propias de la placa de aluminio en cantiléver. Se puede observar que las frecuencias obtenidas por los tres métodos para el primer modo tienen una diferencia máxima de 3,4 Hz equivalente a un 7%. Esta diferencia se puede atribuir a que el método numérico asume una rigidez absoluta en el extremo empotrado que es algo que no se obtiene en la realidad y que los métodos analítico y numérico no tienen en cuenta el amortiguamiento. A pesar de esta diferencia, se puede asumir como una diferencia aceptable y definir que el método experimental utilizado es adecuado para la identificación de las frecuencias propias del elemento.

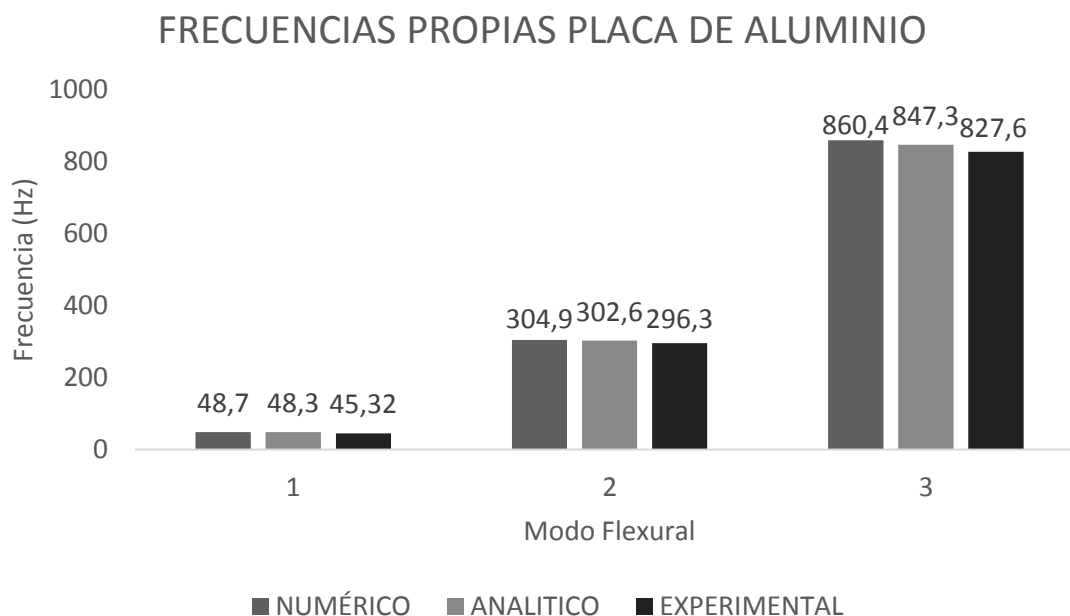


Figura 5.12 Frecuencias propias de una muestra tipo placa de aluminio en cantiléver obtenidas por tres métodos diferentes: Numérico, Analítico y Experimental.

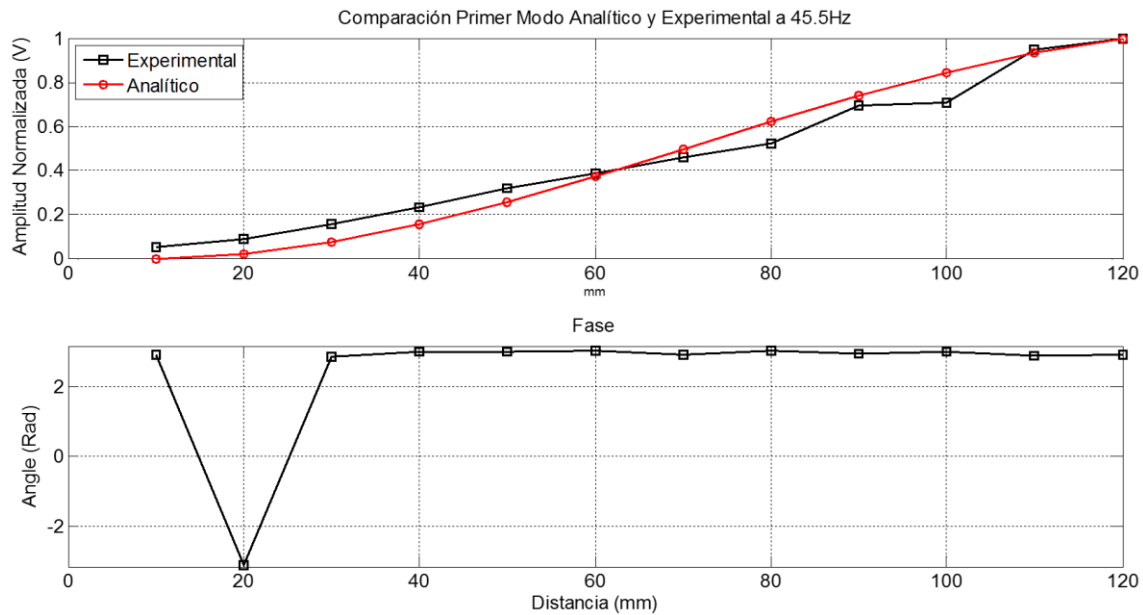


Figura 5.13 Primer modo placa de aluminio en cantiléver a 45.5Hz, comparación entre teórico y experimental.

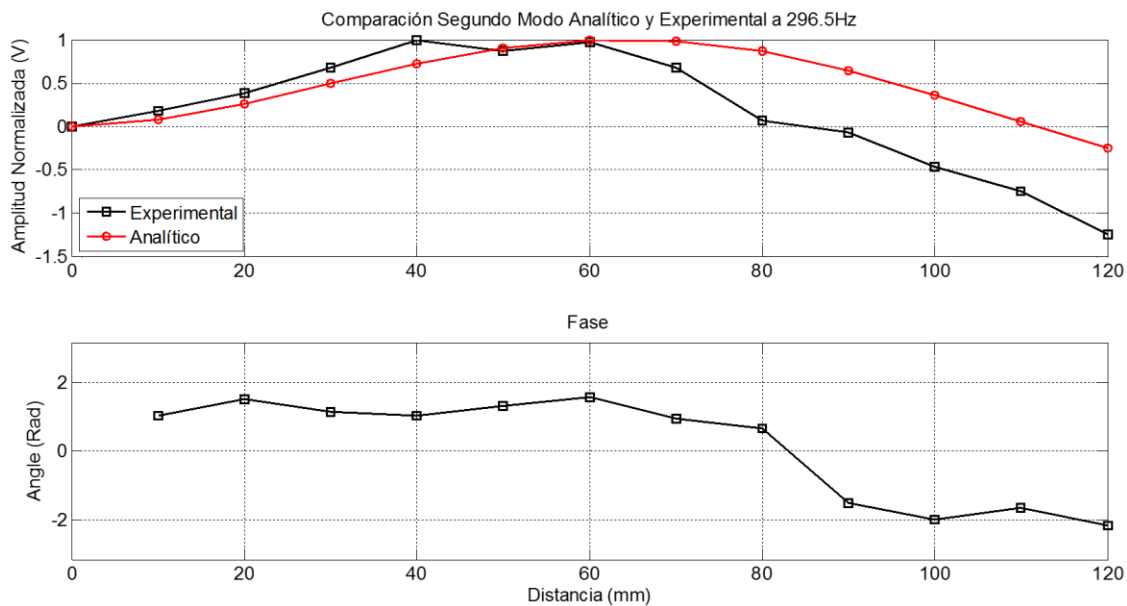


Figura 5.14 Segundo modo de la placa de aluminio en cantiléver a 296.6Hz.

Una vez validadas las dos primeras frecuencias propias, la placa de aluminio fue excitada a las frecuencias mencionadas de 45,5Hz y 296,6Hz y se tomó la amplitud en 12 puntos diferentes a lo largo de una línea central de la placa, espaciados cada 10mm. Las amplitudes en cada punto fueron medidas y se graficaron los valores máximos obtenidos. Identificando las amplitudes en cada punto de la placa a esas frecuencias, se pueden identificar los modos [19]. En la Figura 5.13, se muestra el

primer modo y en la Figura 5.14, se muestra el segundo modo como se mueve la placa de aluminio bajo las condiciones planteadas.

Una vez comparados los resultados obtenidos de manera analítica, numérica y experimental y ver que los resultados coinciden, se concluye que el procedimiento experimental para adquirir los parámetros modales de la muestra es congruente. Se procede a verificar la influencia que tiene un daño en las frecuencias propias del elemento. Para esto se indujeron daños en placas de aluminio con la misma geometría en diferentes posiciones como se muestra en la Figura 4.8 y se hallaron experimentalmente las dos primeras frecuencias propias para comparar si existen diferencia entre ellas. Los resultados obtenidos de las frecuencias propias se muestran en la Tabla 5.1.

Las frecuencias propias obtenidas de aplicar un daño y variar su posición a lo largo de la placa de aluminio, permiten observar primero que la presencia de un daño afecta las frecuencias propias del elemento, ya que se presenta un cambio de frecuencia entre la placa sana y las que tienen el daño. La diferencia que se presenta entre las frecuencias no es demasiado grande, el promedio de la variación es de un 4%. Lo segundo que se puede observar es que la existencia del defecto afecta más un modo que otro. Según Abdo et al [25], La posición del daño afecta la frecuencia propia del elemento debido a la forma del modo, siendo más sensible cuando el defecto se encuentra en una posición donde la deformación es mayor.

Tabla 5.1 Frecuencias propias y factores de amortiguamiento de la placa de aluminio según la posición del daño (Variaciones respecto a los datos de la placa sana).

Posición del daño	Frecuencia Propia 1	Factor de amortig. 1	Frecuencia Propia 2	Factor de amortig. 2	Variación Modo 1	Variación Modo 2
Sana	68,36	0,01867	412,6	0,0021584	0,00%	0,00%
15	63,17	0,001603	403,1	0,0019887	7,59%	2,30%
25	67,14	0,029785	394	0,0023724	1,78%	4,51%
45	63,48	0,015528	402,8	0,0010294	7,14%	2,38%
55	68,05	0,027073	390,3	0,0022139	0,45%	5,40%

5.2.2. Ensayo de resonancia en material reforzado con fibra de carbono.

Con los ensayos realizados, se puede afirmar que se cuenta con un procedimiento experimental adecuado para hallar las propiedades modales de una muestra de geometría semejante. Se pudo demostrar cómo un defecto externo y su posición pueden influir directamente en las propiedades modales del elemento. Se desea saber si se puede extrapolar la hipótesis de que la presencia de un daño en el interior puede influir en las propiedades de un elemento construido en fibra de carbono, debido a su construcción en capas. Para comprobarlo, se construyeron elementos tipo placa como los mencionados en la Tabla 4.1 con daños inducidos de manera controlada y se muestran en los

esquemas de la Figura 4.9 y la Figura 4.10. Las placas fueron ubicadas con el montaje de la Figura 4.15 con un extremo empotrado y el otro libre.

Tabla 5.2 Frecuencias Propias y Factores de Amortiguamiento del Primer Modo, Para Placas en Fibra de Carbono.

	MODO 1			
	SANA		DAÑO	
	Frecuencia Propia	Factor de amortiguamiento	Frecuencia Propia	Factor de amortiguamiento
PLACA1	125	0,0022633	117	0,0052783
PLACA2	118	0,0029955	103	0,0028226
PLACA3	120	0,0042006	109	0,0038854
PLACA4	122	0,003486	117	0,0031552
PLACA5	125	0,0037099	118	0,0020317
PLACA6	128	0,00333106	114	0,00343464
PROMEDIO	123	0,00333106	113	0,00343464

Tabla 5.3 Frecuencias Propias y Factores de Amortiguamiento del Segundo Modo, Para Placas en Fibra de Carbono.

	MODO 2			
	SANA		DAÑO	
	Frecuencia Propia	Factor de amortiguamiento	Frecuencia Propia	Factor de amortiguamiento
PLACA1	792	0,00065341	764	0,0015063
PLACA2	727	0,00068368	685	0,0011428
PLACA3	732	0,00083298	717	0,0010891
PLACA4	751	0,00069588	746	0,00072064
PLACA5	766	0,0010412	757	0,0011974
PLACA6	764	0,00078143	725	0,001131248
PROMEDIO	755	0,00078143	732	0,001131248

Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la Tabla 5.2 y la Tabla 5.3, donde se puede mostrar que la mayor influencia de los daños se presentó en la primera frecuencia propia del elemento. Por esta razón el análisis de diferencias se basó en el primer modo, en el segundo modo se presentan mayores variaciones de las frecuencias, debido a que es más sensible porque las amplitudes son más bajas, lo que se concluye de primera mano que la frecuencia propia es afectada por la distribución de la tela durante el momento de la construcción. Las formas de los modos se presentaron con la misma forma que se mostraron en la Figura 5.13 y la Figura 5.14. Los resultados obtenidos de los primeros modos se muestran en la Figura 5.15, donde se puede observar que para los dos elementos de la misma placa existe una diferencia entre las frecuencias propias, la cual es

en promedio de 8% entre la placa sana y la que tiene el defecto. El promedio de las frecuencias de las placas sanas es de 123Hz con una desviación estándar de 3,38Hz, mientras que el promedio de las placas con defecto es de 113Hz con una desviación estándar de 6,63Hz. Existen un caso en particular que se sale del comportamiento general de las otras placas. Se trata de la placa 2, donde las frecuencias de la zona sana y de la zona con defecto son más bajas que el rango del grupo, por tanto, la frecuencia de la zona sana es similar al promedio de las placas con defecto.

Con los datos obtenidos se realiza un análisis de varianza, asumiendo la hipótesis nula donde los resultados para los dos grupos de elementos serían iguales. Realizando el análisis se obtiene que la probabilidad de que se satisfaga la hipótesis nula es de 0.54%, lo que quiere decir que la probabilidad de que los resultados sean iguales es del 0.54%, por tanto se asume que las respuestas de los dos procedimientos son diferentes.

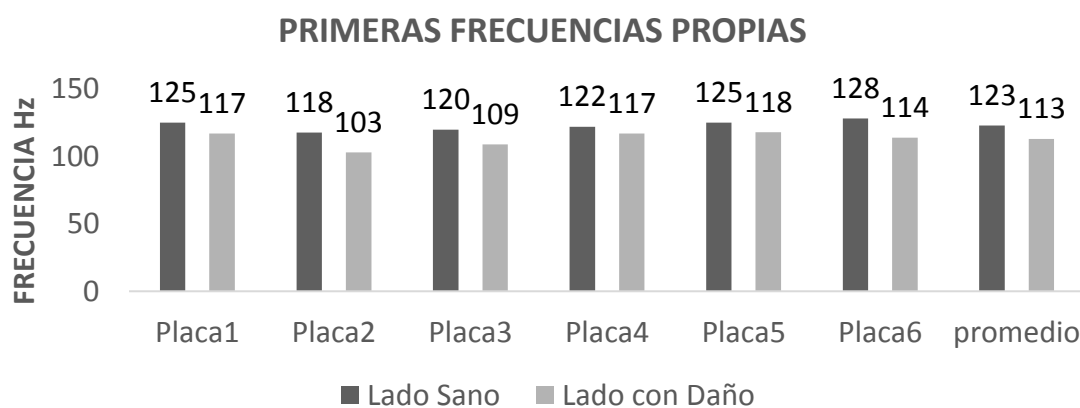


Figura 5.15 Primeras frecuencias propias de elementos en fibra. Eje x: placa evaluada, eje y: frecuencia en Hertz

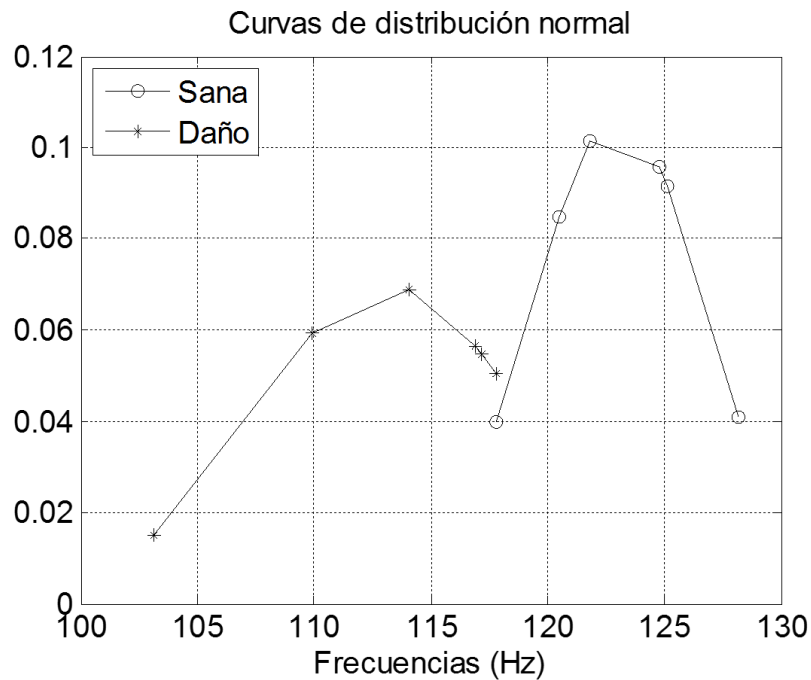


Figura 5.16 Curvas de distribución normal placa con defecto y placa sana frecuencia del primer modo.

Las curvas de distribución normal de las dos frecuencias de las placas con defecto y las placas sanas se muestra en la Figura 5.16, donde el punto que causa que se crucen es el que se refiere a la frecuencia de la zona sana de la placa 2 como una anomalía.

5.3. Procedimiento para evaluación del daño.

Se han utilizado dos procedimientos para la evaluación de muestras construidas en material reforzado con fibra de carbono. Ambos métodos son efectivos para la identificación de fallas al interior del material. La diferencia entre los dos procedimientos es que el análisis modal permite identificar si existe un daño en el material de manera general sin identificar la zona del daño, además que la diferencia entre las frecuencias es de solo un 5% aproximadamente. El procedimiento de transmisión es más específico y permite identificar la zona del daño, para lo cual se debe realizar un escaneo a lo largo de la muestra bajo estudio.

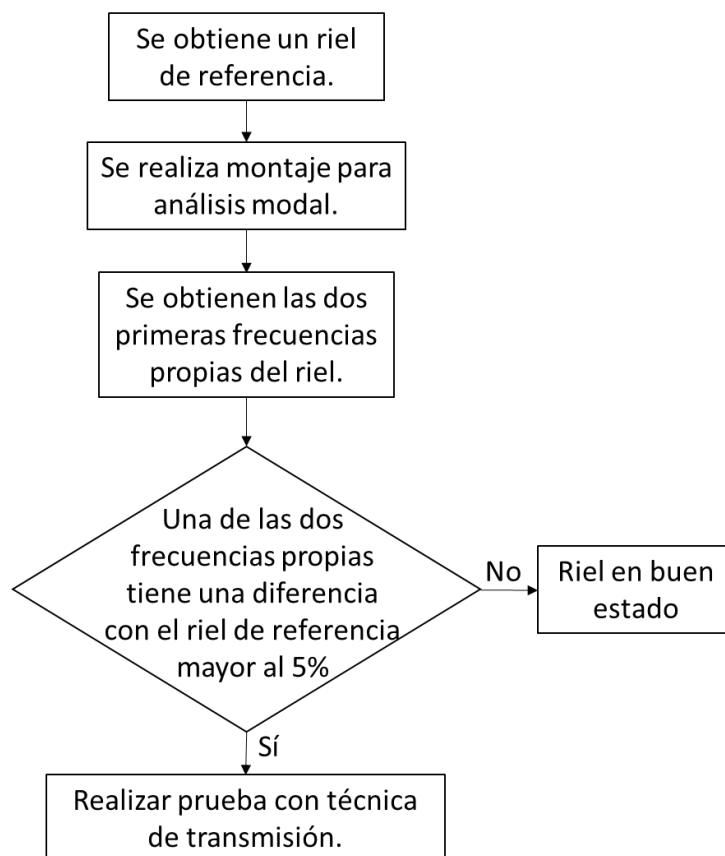


Figura 5.17 Procedimiento general para evaluación de rieles.

En la Figura 5.17 se muestra el procedimiento sugerido para la evaluación de los rieles el cual consiste en la combinación de los procedimientos utilizados para la identificación del daño.

Lo primero que se debe tener es un riel de referencia el cual sirva para comparar los resultados. El siguiente paso es ubicar el riel en el montaje seleccionado para la realización del análisis modal. Se sugiere el montaje mostrado en la Figura 4.14 que es más sencillo para obtener las frecuencias propias del elemento. Si una de las frecuencias propias tiene una diferencia menor o igual al 5% con respecto al riel de referencia, se puede considerar que el riel está en buen estado, en caso contrario se tiene la duda en el estado del riel por lo que se debe evaluar más a fondo el estado. Por lo tanto, se recomienda realizar el procedimiento de transmisión que permita evaluar el interior. Para el procedimiento de inspección por ultrasonido se recomienda el juego de transductores de 250 kHz.

CONCLUSIONES.

Se pudo verificar que las técnicas de ultrasonido son aplicables a elementos contruidos con fibra de carbono de un espesor considerable a pesar de la atenuación de las señales debidas a su construcción en capas. La técnica que permitió identificar la zona de los defectos fue la técnica de transmisión por incidencia normal, la cual mostró una disminución en la intensidad de la señal emitida cuando se encuentra la presencia de un defecto. Para poder aplicar esta técnica, es necesario tener una amplificación de la señal capturada ya que la atenuación es de tres órdenes de magnitud.

Con los transductores utilizados, se identificaron daños con un tamaño mínimo de 10x10mm de área, donde la frecuencia que permitió la ejecución de la prueba fue la centrada en 250KHz. El daño que se puede evaluar es el equivalente a una capa de teflón, lo que indica que debe haber una delgada separación entre las capas de tela, para que la técnica pueda tener mejores resultados.

Las propiedades modales de los elementos cambian en presencia de un defecto, debido a que se afecta su rigidez. El procedimiento de análisis modal es muy general, lo que permite identificar la presencia de un daño sin especificar su ubicación y/o profundidad.

Con los procedimientos de ensayos no destructivos de ultrasonido y análisis modal, se han podido identificar variaciones cuando existe un defecto/delaminación en un elemento. Con los cambios identificados como resultado de las pruebas se ha podido plantear un procedimiento que permite evaluar el estado al interior de rieles de fijadores externos contruidos en fibra de carbono.

TRABAJO FUTURO.

- Proponer un procedimiento de construcción menos artesanal y más repetible de los elementos de fibra de carbono, que permita garantizar las mismas propiedades en todos los elementos construidos.
- Revisar procedimientos basados en análisis modal experimental, para poder tener una ubicación precisa de daños al interior de los elementos en fibra de carbono.
- Realizar ensayos de ultrasonido con sonojets centrados a las frecuencias utilizadas, con el objetivo de mejorar la resolución y poder identificar daños de menor tamaño. Al mejorar la resolución, se puede realizar un C-Scan que permita ver la forma de los daños al interior de los elementos evaluados.
- Realizar ensayos de ultrasonido con incidencia oblicua que permita generar ondas transversales para hacer el análisis de los elementos con defectos.
- Determinar el máximo espesor en el que se puede realizar el ensayo de transmisión, para muestras construidas en fibra de carbono con las características de los elementos evaluados.

BIBLIOGRAFIA

1. Satizabal, C., O. Calderón, and A. García, *Avances en el manejo de heridos en combate en el Hospital Militar Central de Bogotá, Colombia*. Revista Med, 2006. **14**(1).
2. Aronson, J., *Current concepts review-limb-lengthening, skeletal reconstruction, and bone transport with the Ilizarov method*. JBJS, 1997. **79**(8): p. 1243-58.
3. Lasso, P.A., *Diseño, construcción y evaluación de un fijador externo de Ilizarov para tratamiento de fractura de tibia*. 2001, Universidad del Valle: Cali, Colombia.
4. Quintero, F.O., *Diseño, construcción y evaluación de un fijador externo monolateral de urgencias para tratamiento de fracturas en huesos largos*. 2001, Universidad del Valle: Cali, Colombia.
5. Ortega, F., *Diseño, construcción y evaluación de un riel con material compuesto FC/EP para un fijador externo de transporte óseo*. 2010, Universidad del Valle: Cali, Colombia.
6. Lopez, J.F.G.y.J., *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de fijación externa para transporte y alargamiento óseo*. 2015, Universidad del Valle: Cali, Colombia.
7. Carrera, A.F., *Desarrollo de un dispositivo de fijación externa para transporte y alargamiento óseo*. 2016, Universidad del Valle: Cali, Colombia.
8. Sharma, M., et al., *Carbon fiber surfaces and composite interphases*. Composites Science and Technology, 2014. **102**: p. 35-50.
9. Park, S.-J. and S.-Y. Lee, *History and Structure of Carbon Fibers*, in *Carbon Fibers*. 2015, Springer. p. 1-30.
10. Ku, H., et al., *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*. Composites Part B: Engineering, 2011. **42**(4): p. 856-873.
11. UnnÞórsson, R., M. Jonsson, and T. Runarsson, *NDT methods for evaluating carbon fiber composites*. Proceedings of the Composites Testing and Model Identification, Bristol, UK, 2004: p. 21-23.
12. La Saponara, V. and R. Elhajjar, *Experimental Methods to Quantify Microdamage and Microstructure Anomalies in Fiber-Reinforced Polymer Composites: Overview*, in *Handbook of Damage Mechanics*. 2015, Springer. p. 1325-1348.
13. Sause, M.G., *In situ monitoring of fiber-reinforced composites: theory, basic concepts, methods, and applications*. Vol. 242. 2016: Springer.
14. Scott, I. and C. Scala, *A review of non-destructive testing of composite materials*. NDT international, 1982. **15**(2): p. 75-86.
15. Kinsler, L.E., et al., *Fundamentals of acoustics*. Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999., 1999: p. 560.
16. Bruneau, M., *Fundamentals of acoustics*. 2013: John Wiley & Sons.
17. Jhang, K.-Y., *Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review*. International journal of precision engineering and manufacturing, 2009. **10**(1): p. 123-135.
18. Ensminger, D. and L.J. Bond, *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. 2011: CRC press.
19. Schwarz, B.J. and M.H. Richardson, *Experimental modal analysis*. CSI Reliability week, 1999. **35**(1): p. 1-12.
20. Ewins, D.J., *Modal testing: theory and practice*. Vol. 15. 1984: Research studies press Letchworth.

21. Poncelet, F., G. Kerschen, and J.-C. Golinval. *Experimental modal analysis using blind source separation techniques. International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, 2006.* 2006.
22. Leissa, A.W. and M.S. Qatu, *Vibrations of Continuous Systems.* 2011: McGraw-Hill.
23. Hagedorn, P. and A. DasGupta, *Vibrations and waves in continuous mechanical systems.* 2007: John Wiley & Sons.
24. Rao, S.S. and F.F. Yap, *Mechanical vibrations.* Vol. 4. 2011: Prentice Hall Upper Saddle River.
25. Abdo, M.-B. and M. Hori, *A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes.* Journal of Sound and vibration, 2002. **251**(2): p. 227-239.