

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA DE YUCATÁN.*

**UNIDAD DE MATERIALES.**

*TESIS DE MAESTRÍA:*

*CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN MATERIAL  
COMPUESTO A BASE DE HDPE-CACO<sub>3</sub>-FIBRA  
CORTA DE HENEQUÉN.*

*QUE PRESENTA:*

*Gibran Nava Ordoñez.*

*EN OPCIÓN AL TÍTULO DE:*

***MAESTRO EN CIENCIAS.***

*MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO, MARZO DE 2005.*

## *RESUMEN.*

El ruido a través del tiempo, siempre ha sido un problema ambiental y, por lo mismo, desde hace siglos han existido reglamentaciones para su control. Sin embargo, en comparación con otros contaminantes, el control del ruido no es del todo suficiente, ya que es una consecuencia inherente a la vida cotidiana del ser humano, los niveles de ruido han ido en aumento con el avance de la tecnología. La exposición a altos niveles de ruido de forma cotidiana, ocasiona trastornos físicos y psicológicos al ser humano.

Existe una gran variedad de materiales aislantes acústicos para el uso de paneles de separación en la industria de la construcción. Las propiedades que deben presentar estos materiales son rigidez, porosidad y alta densidad. En este trabajo se estudian las características y propiedades de aislamiento acústico de un material compuesto que consta de una matriz de polietileno de alta densidad, una carga mineral de  $\text{CaCO}_3$  y, un refuerzo de fibra corta de henequén tratada superficialmente, con una composición de 50%, 20% y 30 % respectivamente. Se propone usar a estos materiales como aislantes acústicos en forma de tejas y paneles de separación. Los tres tipos de materiales usados tienen la misma formulación, la diferencia entre ellos es el tratamiento químico superficial que se le dio a la fibra, con el fin de obtener diferentes interacciones interfaciales.

Los experimentos a que fueron sometidos estos materiales se dividieron en dos. Los primeros experimentos donde se caracterizaron las propiedades mecánicas y de emisión acústica (*EA*), simultáneamente. Los segundos experimentos donde se caracterizó la propiedad de capacidad de aislamiento acústico (*AA*).

En la caracterización mecánica, se observó que la distribución de los componentes no era uniforme debido al método de fabricación empleado, dando lugar a tres regiones a lo ancho de la cinta, denominadas como *Lado 1*, *Centro* y *Lado 2*. Esto repercutió en sus propiedades mecánicas haciendo que variaran en cada región.

De los gráficos de *EA* se determinaron los dominios correspondientes a cada tipo de falla en el material y, se correlacionaron con el gráfico de *esfuerzo-deformación*.

Para la caracterización de la capacidad del *AA* se diseñó y construyó un sistema para evaluar la atenuación debida a los materiales, en estos experimentos se obtuvo un espectro barriendo las frecuencias de 300 a 15,000

Hz, en el cual se identificaron las regiones de propagación, siendo de interés la región 2, pues es la que está regida por la ley de masas, por tanto, la atenuación es debida directamente al material, ya que en la región 1 la atenuación se debe a la distancia entre bocina y micrófono y, en la región 3 ocurren resonancias que disminuyen la eficiencia del material aislante.

En la región 2 se observaron las diferencias debido a los tres tipos de interacción en las interfases. También se observó que a bajas frecuencias (por debajo de 1000 Hz) la longitud de onda de las ondas incidentes es demasiado grande para que el material la atenúe; por otro lado, a frecuencias arriba de 7000 Hz el material presenta el efecto de coincidencia y, deja de ser un buen aislante acústico.

## ***ABSTRACT.***

The noise through time has always been an environmental problem; therefore, since centuries ago, there had been rules for noise control. However, compared with other pollutants, noise control is not enough, because it is an inherent consequence of human daily life, the noise levels increase as the technology advances. The exposure to high-level noise can lead to physical and psychological diseases.

There is a big variety of acoustic isolating materials used as separating panels in the field of construction. This kind of materials must possess some desirable properties such as stiffness, porosity and high density. In this work, it was used a composite consisting of HDPE as matrix  $\text{CaCO}_3$  as filler and surface-treated short henequen fiber as reinforcement, in proportions of 50%, 20% and 30% respectively. It is proposed to use these composites as acoustic isolating materials like tiles and separating panels. The three kinds of composites used have the same composition; the only difference was the chemical treatment on the fiber surface, in order to obtain different interfacial adhesion levels.

Two kinds of tests were performed. The first test was the simultaneous characterization of mechanical and acoustic emission (*AE*) properties. The second test was the characterization of the acoustic isolation capability (*AI*). In the mechanical and *AE* characterization, it was observed that the properties were not uniform through the width of the band and the three different regions named as *Side 1*, *Center* and *Side 2* were distinguished. The dispersion shown had consequences by varying the mechanical behaviour in each region. In the *AE* plots were defined several domains corresponding to the different failure modes in the composite we noticed and these domains were correlated to the *stress-strain* curve.

In the *AI* capability characterization was designed and built a device for evaluating the attenuation attributed to the composites; in this test, a plot was constructed scanning frequencies from 300 to 15,000 Hz, in this plot, the propagation regions were recognized, the region 2 was interesting because this region is ruled by the mass law, thus, the attenuation is only attributed to the composite, because in the region 1 the attenuation is due to the distance between the speaker and the microphone and, in region 3 the resonance diminish the attenuation efficiency of the isolating composite.

In the region 2, notorious differences were observed, these differences were attributed to the three types of surface-treatment of the fibers. It was observed

at low frequencies (below 1000 Hz) the wave length of the incident waves was very big and the composite could not attenuate this sound; on the other hand, at high frequencies (above 7000 Hz), the composite got in the coincidence zone and could not be an efficient acoustic isolating material any longer.

## *LISTA DE FIGURAS.*

**Figura 1.1:** Esquema del método de extracción de fibra (Pull-Out).

**Figura 1.2:** A la izquierda un creciente número de rupturas en la fibra al ir aumentando la carga en la matriz. A la derecha, la fibra en función de la posición respectiva a los niveles de deformación de la matriz.

**Figura 1.3:** Esquema del método de micro indentación, en donde se mide la fuerza necesaria para romper la adhesión interfacial.

**Figura 1.4:** Demostración de equivalencias en decibeles de voltaje y potencia.

**Figura 1.5:** Tipos de reflexión de un haz sonoro.

**Figura 1.6:** Refracción del sonido en ambiente a) frío alcanzando grandes distancias al refractarse hacia abajo y b) cálido en donde el sonido no puede recorrer grandes distancias pues se refracta hacia arriba.

**Figura 1.7:** Difracción de un frente de onda ante una ranura a) mucho menor a la longitud de onda, y b) mayor o igual a la longitud de onda.

**Figura 2.1:** Agave precursor del henequén.

**Figura 2.2:** Extrusor Nieto y calandra de 3 rodillos.

**Figura 2.3:** Cortador neumático.

**Figura 2.4:** Máquina de pruebas universales

**Figura 2.5:** Sensores piezoeléctricos y preamplificadores usados en las pruebas de EA.

**Figura 2.6:** Sistema para la caracterización del Aislamiento Acústico de placas.

**Figura 3.1:** Señal obtenida por emisión acústica y sus parámetros.

**Figura 3.2:** Representación esquemática de la emisión de ondas acústicas por fallas micro-estructurales de un material.

**Figura 3.3:** Principio básico del método de registro y medición de emisión acústica.

**Figura 3.4a:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud.

**Figura 3.4b:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

**Figura 3.5:** Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

**Figura 3.6:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-deformación correlacionadas para observar los elementos de falla (material SIL).

**Figura 3.7:** Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

**Figura 3.8:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

**Figura 3.9:** Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

**Figura 3.10:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-tiempo correlacionadas para observar los elementos de falla (material NaOH).

**Figura 3.11:** Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

**Figura 3.12:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

**Figura 3.13:** Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

**Figura 3.14:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-deformación correlacionadas para observar los elementos de falla (material ST).

**Figura 3.15:** Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

**Figura 3.16:** Gráfico en donde se comparan los esfuerzos promedio de los tres materiales y sus tres regiones.

**Figura 3.17:** Gráfico que compara el módulo elástico de los tres materiales y sus tres regiones con su error.

**Figura 3.18:** Gráfico que compara la deformación de los tres materiales y sus tres regiones con su error.

**Figura 4.1:** Representación gráfica de la Ley de Masa.

**Figura 4.2a:** Esquema simplificado del efecto de coincidencia.

**Figura 4.2b:** Visualización del efecto de coincidencia.

**Figura 4.3:** Gráfico de Pérdida de Transmisión sonora en función de la frecuencia y sus regiones de propagación

**Figura 4.4:** Mecanismo de atenuación de las ondas a través de un material

**Figura 4.5:** Diagrama del sistema de medición de aislamiento acústico

**Figura 4.6:** Representación esquemática de la Ley Cuadrática Inversa.

**Figura 4.7:** Gráfico de la atenuación presentada por los materiales.

**Figura 4.8:** Espectro de las amplitudes registradas de los tres materiales comparados con la señal sin atenuación

**Figura 4.9a:** Intervalo de amplitud contra frecuencia atribuido a la interfase de los materiales.

**Figura 4.9b:** Intervalo que muestra el error experimental de los tres materiales en la zona de resonancias.

**Figura 4.9c:** Espectro acústico de una placa de polietileno puro.

**Figura 4.10:** Intervalo de amplitud contra frecuencia atribuido a la matriz.

**Figura 4.11:** Gráfica de la diferencia de fase como función de la frecuencia.

**Figura 4.12:** Comparación de las señales de amplitud y de diferencia de fase para el material con fibra a) SIL, b) NaOH y c) ST.

La línea sólida es la señal de amplitud, la línea punteada es la señal de diferencias de fase.

## *LISTA DE TABLAS.*

**Tabla 1.1:** Comparación del incremento en la potencia con el incremento logarítmico.

**Tabla 3.1:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Centro.

**Tabla 3.2:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Lado 1.

**Tabla 3.3:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Lado 2.

**Tabla 3.4:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Centro.

**Tabla 3.5:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Lado 1.

**Tabla 3.6:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Lado 2.

**Tabla 3.7:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Centro.

**Tabla 3.8:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Lado 1.

**Tabla 3.9:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Lado 2.

## CONTENIDO.

<b>OBJETIVOS.</b> .....	- 3 -
<b>CAPÍTULO I.</b> .....	- 4 -
<b>INTRODUCCIÓN.</b> .....	- 4 -
1.1. MATERIALES COMPUESTOS. ....	- 4 -
1.2. PROPÓSITO DE ESTE TRABAJO. ....	- 8 -
1.3. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA.....	- 9 -
1.3.1. LA ECUACIÓN DE ONDA. ....	- 10 -
1.3.2. SOLUCIÓN GENERAL DE LA ECUACIÓN DE ONDA. ....	- 10 -
1.3.3. TEOREMA DE FOURIER. ....	- 11 -
1.3.4. DEFINICIONES DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA ONDA	- 13 -
1.4. ESPECTRO ACÚSTICO.....	- 14 -
1.4.1. INTENSIDAD.....	- 15 -
1.4.1.1. DECIBELES (dB). ....	- 16 -
1.4.1.2. SISTEMA DE NOTACIÓN DEL DECIBELIO. ....	- 17 -
1.4.1.3. SUMA DE DECIBELES .....	- 20 -
1.4.2. TONO.....	- 21 -
1.4.3. TIMBRE. ....	- 21 -
1.4.4. EVOLUCIÓN TEMPORAL.....	- 22 -
1.5. MECANISMOS DE PROPAGACIÓN Y FENÓMENOS. ....	- 22 -
1.5.1. REFLEXIÓN.....	- 23 -
1.5.2. ABSORCIÓN. ....	- 23 -
1.5.3. REFRACCIÓN. ....	- 24 -
1.5.4. DIFRACCIÓN. ....	- 25 -
1.5.5. INTERFERENCIA.....	- 25 -
1.5.6. RESONANCIA. ....	- 26 -
<b>CAPÍTULO II.</b> .....	- 27 -
<b>MATERIALES Y MÉTODO.</b> .....	- 27 -
2.1. ANTECEDENTES. ....	- 27 -
2.1.1. FIBRA CORTA DE HENEQUÉN. ....	- 27 -
2.1.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).....	- 28 -
2.2. DESCRIPCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES.....	- 30 -
2.3. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DE LAS FIBRAS. ....	- 30 -
2.3.1. TRATAMIENTO CON SOLUCIÓN ALCALINA. ....	- 30 -
2.3.2. TRATAMIENTO CON SILANO. ....	- 30 -
2.3.3. TRATAMIENTO DEL $\text{CaCO}_3$ . ....	- 31 -
2.4. MATERIAL COMPUESTO.....	- 31 -
2.5. EQUIPO. ....	- 32 -

2.5.1. CORTADOR NEUMÁTICO.....	- 32 -
2.5.2. MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSALES. ....	- 33 -
2.5.3. EQUIPO DE EMISIÓN ACÚSTICA. ....	- 33 -
2.5.4. EQUIPO DE ATENUACIÓN ACÚSTICA. ....	- 34 -
<b>CAPÍTULO III.</b> .....	<b>- 35 -</b>
<b>CARACTERIZACIÓN POR EMISIÓN ACÚSTICA.</b> .....	<b>- 35 -</b>
3.1. ANTECEDENTES. ....	- 35 -
3.2. GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE ONDAS DE EMISIÓN ACÚSTICA. ....	- 36 -
3.3. EXPERIMENTAL.....	- 38 -
3.5. ANÁLISIS DEL MATERIAL SIL.....	- 40 -
3.5. ANÁLISIS DEL MATERIAL NaOH.....	- 46 -
3.6. ANÁLISIS DEL MATERIAL ST. ....	- 50 -
3.7. DISCUSIÓN.....	- 55 -
<b>CAPÍTULO IV.</b> .....	<b>- 58 -</b>
<b>CAPACIDAD DE AISLAMIENTO ACÚSTICO.</b> .....	<b>- 58 -</b>
4.1. ANTECEDENTES. ....	- 58 -
4.2. ATENUACIÓN EN UN MEDIO NO HOMOGÉNEO. ....	- 60 -
4.3. LEY DE MASA.....	- 61 -
4.4. EFECTO DE COINCIDENCIA.....	- 62 -
4.5. REGIONES DE PROPAGACIÓN. ....	- 63 -
4.6. EXPERIMENTAL.....	- 65 -
4.7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	- 68 -
<b>CONCLUSIONES GENERALES.</b> .....	<b>- 77 -</b>
<b>APÉNDICE.</b> .....	<b>- 80 -</b>
DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ONDA. ....	- 80 -
<b>REFERENCIAS.</b> .....	<b>- 85 -</b>

## **OBJETIVOS.**

### **OBJETIVO GENERAL.**

Caracterizar mecánica y acústicamente tres materiales compuestos reforzados con fibra corta de henequén con distintos niveles de interacción interfacial para su uso como aislantes acústicos.

### **OBJETIVOS PARTICULARES.**

- 1.1. Caracterizar las propiedades mecánicas de los tres materiales usando la herramienta *EA* para verificar el modo de falla.
  - 1.1.1. De los gráficos de *EA*, detectar los dominios correspondientes a los diferentes modos de falla.
  - 1.1.2. Correlacionar los dominios detectados con los gráficos de esfuerzo-deformación.
- 1.2. Caracterizar las propiedades acústicas de los tres materiales.
  - 1.2.1. Diseñar y construir un sistema para la caracterización de la capacidad de *AA* de placas.
  - 1.2.2. Evaluar y analizar la capacidad de aislamiento de cada material compuesto.

# *CAPÍTULO I.*

## *INTRODUCCIÓN.*

### *1.1. MATERIALES COMPUESTOS.*

Durante todos los tiempos ha habido una continua búsqueda por mejorar el desempeño de los materiales que se utilizan en la vida diaria. Este desempeño se basa en varios criterios, los cuales incluyen que sean más ligeros, más fuertes y de menor costo. Los materiales actuales frecuentemente alcanzan el límite de sus propiedades y por lo tanto de su utilidad. Así, los investigadores en el área de materiales están siempre en el dilema de producir materiales tradicionales mejorados o, producir materiales que combinen las propiedades de los ya existentes. En esta última categoría tenemos a los materiales compuestos (*compositos*). Los materiales compuestos se usan prácticamente desde que el hombre inició la civilización. Como ejemplo claro son las antiguas viviendas Mayas, las cuales estaban y están construidas con lodo (barro) como matriz y ramas de un arbusto particular, formando lo que se conoce como adobe, que no es otra cosa que un material compuesto.

Un material compuesto se puede definir como una combinación de dos o más materiales de naturaleza y propiedades diferentes, que al unirse presentan unas cualidades totalmente distintas a las exhibidas por los constituyentes. Esto es, debido a que cada componente desempeña una función particular dentro del material compuesto. Como hay una inmensa variedad de materiales compuestos, pueden ser clasificados en materiales estructurales y funcionales. Los estructurales son usados principalmente por sus buenas propiedades mecánicas, mientras que los funcionales son usados por propiedades más específicas como eléctricas, químicas, térmicas o acústicas entre otras. Los materiales compuestos, básicamente son de metales, cerámicos o polímeros. De los tres tipos de materiales se pueden utilizar como cargas de refuerzo, así como también, usarse como matriz.

Los materiales compuestos reforzados con fibra, consisten de fibras que son continuas o cortas, embebidas en una matriz que a su vez puede ser metálica, cerámica o polimérica, dependiendo del uso al que son destinados. Los materiales compuestos reforzados con fibra son materiales estructurales, debido a la clara función que cada componente desempeña: la fibra soporta toda la carga aplicada, la matriz une a las fibras y, por lo tanto, distribuirá la carga, además de que protegerá a las fibras de cualquier tipo de daño mecánico o químico.

La mayoría de las propiedades de los materiales compuestos, son una función compleja de un número de parámetros, de tal forma que los valores de estos parámetros no pueden ser determinados completamente por la ley de mezclas [5]. Las características de resistencia de la interfase entre la fibra y la matriz son de particular importancia en las propiedades del material compuesto. La resistencia de enlace interfacial debe de ser lo suficientemente alta para poder transferir la carga de la matriz a las fibras.

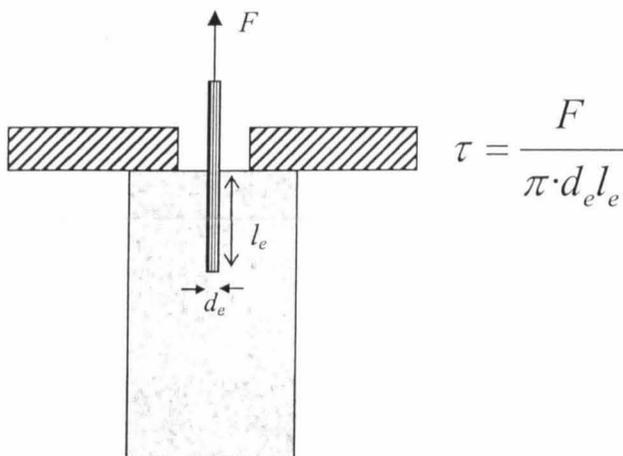
Una buena interacción interfacial ocurre cuando la matriz ha “mojado” completamente al refuerzo y, esto lleva a un contacto íntimo entre la matriz y el refuerzo. Este contacto se lleva a cabo a través de interacciones, las cuales son debidas a diferentes tipos de enlaces. A continuación se describen los diferentes tipos de enlaces interfaciales que se pueden tener en un material compuesto [5-7]:

- *ENLACE MECÁNICO*. Este tipo de enlace ocurre puramente a la sujeción, agarre o trabado mecánico (*mechanical interlocking*) de 2 superficies. La fuerza del enlace se incrementa al ser más rugosa e irregular la superficie de la interfase. El enlace es mas efectivo cuando la fuerza aplicada es paralela a la interfase, es decir, la fuerza de corte es considerable.
- *ENLACE ELECTROSTÁTICO*. Este enlace ocurre entre la matriz y el refuerzo cuando una superficie está cargada positivamente y la otra cargada negativamente. Esto genera una atracción electrostática la cual dependerá de la diferencia de carga en sus superficies. Las interacciones electrostáticas son de corto alcance y son solo efectivas en pequeñas distancias del orden de dimensiones atómicas. Por lo que las impurezas sobre la superficie decrece la efectividad de este mecanismo de enlace.
- *ENLACE QUÍMICO*. En ciencia de los materiales, el enlace químico es formado entre grupos químicos en la superficie del refuerzo y grupos compatibles en la superficie de la matriz. La fuerza depende del número de enlaces por unidad de área y el tipo de enlace. Se piensa que este tipo de enlace es determinante para la efectividad de algunos agentes acoplantes.
- *ENLACE DE INTERDIFUSIÓN O REACCIÓN*. Los átomos o las moléculas de los dos componentes del material compuesto, pueden interdifundirse en la interfase para dar paso a este tipo de enlace. Para interfaces que involucran a polímeros, este tipo de enlace puede considerarse, en

términos simples, como el enredamiento de las moléculas. Muchos factores controlan la fuerza de esta interfase, entre ellos la distancia a la cual las moléculas se han difundido, la penetración del enredamiento (*entanglement*) de las moléculas y el número de moléculas por unidad de área de la interfase.

La interfase juega un papel importante en las propiedades del material compuesto, se han desarrollado varios métodos para la caracterización interfacial. A continuación se mencionan los métodos más comúnmente usados para la caracterización de las propiedades interfaciales [5-7]:

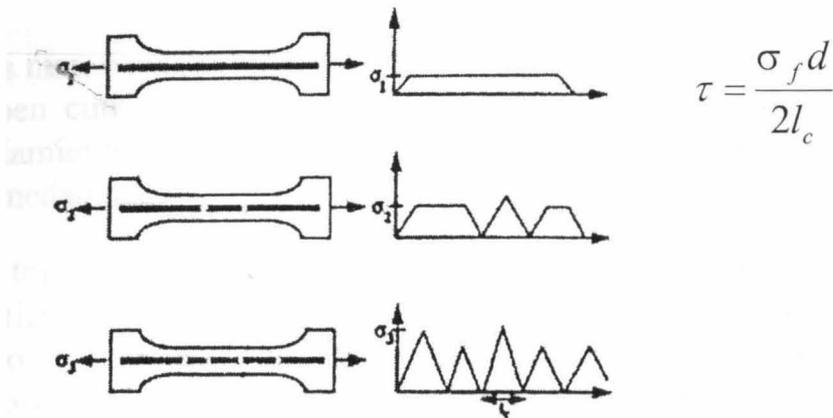
- *EXTRACCIÓN DE FIBRA (PULL-OUT)*. Esta técnica consiste en extraer una fibra parcialmente embebida en la matriz. Se obtiene la fuerza de tensión necesaria para extraer a la fibra de la matriz como una función de la deformación. De estos experimentos se puede obtener el esfuerzo de corte interfacial,  $\tau$ , como una función de la fuerza de tensión aplicada dividida por el área de contacto de la fibra.



**Figura 1.1:** Esquema del método de extracción de fibra (Pull-Out).

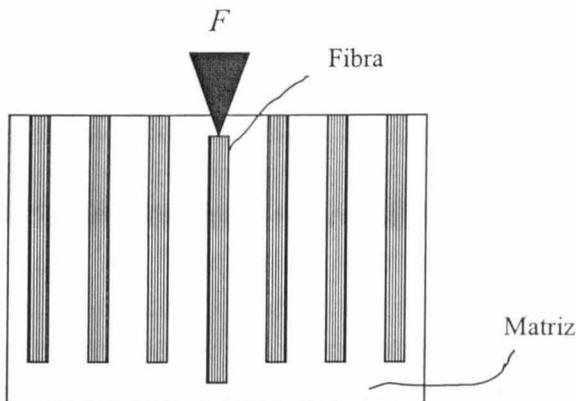
- *FRAGMENTACIÓN DE FIBRA*. En esta técnica se tiene totalmente embebida a la fibra en una matriz y, es sometida a una carga de tensión hasta que el proceso de fragmentación de la fibra concluya y alcance una longitud crítica.

El esfuerzo cortante interfacial es la forma de medir al nivel de adhesión entre fibra y matriz y, puede calcularse con un balance de fuerzas que resulta en una ecuación diferencial y, una de las soluciones es:



**Figura 1.2:** A la izquierda un creciente numero de rupturas en la fibra al ir aumentando la carga en la matriz. A la derecha, la fibra en función de la posición respectiva a los niveles de deformación de la matriz.

- MICRO-INDENTACIÓN.** Esta técnica emplea un dispositivo de evaluación de dureza. La ventaja es que el espécimen no necesita de preparaciones especiales a excepción de que una de las superficies debe de ser pulida hasta tener un acabado adecuado para un examen de microscopía. Una carga  $P$  es aplicada al centro de la fibra cuyo eje es normal a la superficie, causando que la fibra se deslice a través de la interfase fibra-matriz.



**Figura 1.3:** Esquema del método de micro indentación, en donde se mide la fuerza necesaria para romper la adhesión interfacial.

El esfuerzo cortante interfacial es calculada mediante modelos matemáticos de elemento finito construidos a partir del análisis de los resultados experimentales.

- *EMISIÓN ACÚSTICA*. Esta técnica consiste en registrar las ondas elásticas (acústicas) durante el rompimiento de la interfase de la matriz y/o de la fibra al ser sometido el material compuesto a un ensayo de tracción.

Los materiales compuestos que van a ser usados en el ramo de la construcción, deben cumplir una serie de normativas, por ejemplo, algunas de ellas son: aislamiento térmico, aislamiento acústico, flamabilidad, resistencia a la humedad, etc.

La transmisión de ondas acústicas a través de un material polimérico es de particular interés, ya que estos son los que presentan una mayor resistencia al paso del sonido. Los elastómeros son los más aislantes, seguido de los amorfos y después los semicristalinos. Los fenómenos de más importancia son la absorción y reflexión del sonido, así como su cambio de velocidad de un medio a otro.

## *1.2. PROPÓSITO DE ESTE TRABAJO.*

En este trabajo se estudian las propiedades acústicas de un material compuesto a base de polietileno de alta densidad, fibra corta de henequén y  $\text{CaCO}_3$ , que ha sido objeto de investigaciones anteriores y, se propone aplicarlo en el ramo de la construcción como tejas y paneles [34-37]. Se van a evaluar las propiedades acústicas al modificar el tipo de interfase entre la fibra y la matriz. Debido a esto, se hacen tres materiales cuya única diferencia es la intensidad de interacción interfacial: nula, media y alta. Estos materiales son sometidos a dos tipos de ensayos acústicos.

El primer ensayo se denomina Emisión Acústica (*EA*). Básicamente es detectar las ondas elásticas que se liberan al romperse el material compuesto durante ensayos de tracción. El segundo es el Aislamiento Acústico (*AA*). Es la comparación de la intensidad entre las ondas sonoras que inciden en el material compuesto con las ondas que salen del material. Este último ensayo, se realizará de forma diferente al que comúnmente se realiza a nivel de ingeniería. Se hará incidir una onda perfectamente caracterizada, o sea, se tendrá dominio sobre los parámetros de amplitud y frecuencia, detectándose la onda saliente del material, analizando las variaciones que sufren estos parámetros respecto a los de la onda incidente.

El formato de este trabajo se presenta con un capítulo de introducción, donde se dan las bases teóricas para la comprensión de la acústica y fundamentos de los materiales compuestos; un capítulo en donde se presenta una descripción

de los materiales y equipo usados en los experimentos efectuados; un capítulo de caracterización de propiedades mecánicas con *EA* con antecedentes generales y conceptos fundamentales de la técnica, así como la parte experimental y la discusión de los resultados obtenidos; un capítulo de la capacidad de *AA* de los materiales con antecedentes sobre el ruido y formas de control del mismo, teoría y definiciones acerca de *AA*, su parte experimental y la discusión de los resultados obtenidos; finalmente una sección de conclusiones generales donde se da una revisión a todo el trabajo de forma conjunta.

A continuación se dan los elementos básicos de la teoría de ondas acústicas.

### 1.3. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA.

La acústica es la parte de la física que estudia las leyes que gobiernan a las ondas elásticas, su producción, transmisión a través de un medio, recepción, análisis de sus componentes y efectos.

Cuando tenemos un medio (gas, líquido o sólido) e introducimos una perturbación, esta se desplaza a través de medio, si llega hasta un oído humano y es capaz de producir una sensación auditiva, decimos que es un sonido. Este sonido viaja a una velocidad en el medio, que dependerá de las propiedades del mismo medio. El sonido al desplazarse, tiene una frecuencia, comprendida entre los 20 Hz y 20 KHz. A los sonidos con frecuencias inferiores a 20 Hz se les llama *infrasónicos* y a los que tienen una frecuencia superior a 20 KHz se denominan *ultrasónicos*.

La energía causante del sonido, se propaga en medios elásticos y puede ser transmitida a otros medios formados por distintos materiales: sólidos, gases o líquidos. La característica de este movimiento es que la energía se transmite sin que haya desplazamiento de materia. A este tipo de movimiento se le conoce como movimiento ondulatorio y puede ser representado tanto física como matemáticamente por una onda.

Existen dos tipos de ondas sonoras dependiendo de como se desplacen las partículas por el medio [1-2,8]:

*Ondas Longitudinales*: Cuando el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación.

*Ondas Transversales:* Cuando el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación.

### 1.3.1. LA ECUACIÓN DE ONDA.

La ecuación de onda es la herramienta matemática que sirve para describir el movimiento de una onda en un medio.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Esta ecuación es la que describe el comportamiento del sonido en cualquier medio. Físicamente esta ecuación dice que  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$  representa la aceleración vertical en el punto  $x$ . Por lo tanto, la ecuación se puede interpretar diciendo que la aceleración en cada punto del desplazamiento es debida a la tensión o amplitud, y que entre más grande sea la concavidad  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$  más grande será la fuerza restauradora. Donde  $c$  es una constante de proporcionalidad. [3-4,8-9]

### 1.3.2. SOLUCIÓN GENERAL DE LA ECUACIÓN DE ONDA.

La ecuación de onda es una ecuación diferencial parcial de segundo orden. Su solución completa tiene dos funciones arbitrarias. La solución general será del tipo [4,8-9]:

$$\xi(x, t) = \xi_1(ct - x) + \xi_2(ct + x)$$

Donde  $\xi_1(ct - x)$  y  $\xi_2(ct + x)$  son funciones arbitrarias con argumentos  $(ct - x)$  y  $(ct + x)$  respectivamente.

A continuación se dan ejemplos de estas funciones arbitrarias:

$$\log(ct \pm x), (ct \pm x)^2, \text{sen}[\omega(t \pm x/c)], \exp[j\omega(t \pm x/c)], \text{ y } (ct \pm x)^{-1/2}.$$

Considérese la función  $\xi_1(ct - x)$ , y sea  $w = ct - x$ . Entonces la primera derivada parcial con respecto al tiempo es:

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial t} = \frac{d\xi_1}{dw} \frac{\partial w}{\partial t} = c \frac{d\xi_1}{dw}$$

Repitiendo esta misma diferenciación parcial con respecto al tiempo, da:

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = c^2 \frac{d^2 \xi_1}{dw^2} \quad (a)$$

De forma similar, se deriva ahora con respecto a  $x$ :

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = \frac{d\xi_1}{dw} \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{d\xi_1}{dw}$$

La segunda derivada parcial será:

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial w^2} = \frac{d^2 \xi_1}{dx^2} \quad (b)$$

Combinando las ecuaciones (a) y (b)

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = c^2 \frac{d^2 \xi_1}{dx^2}$$

Rearreglando se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

De la misma forma se puede demostrar que  $\xi_2(ct + x)$  también es una solución particular de la ecuación de onda. Así, se deduce que cualquier función con argumento  $(ct \pm x)$  es una solución de la ecuación. La suma de estas dos soluciones  $\xi_1$  y  $\xi_2$  representan la solución general de la ecuación de onda.

### 1.3.3. TEOREMA DE FOURIER.

La onda sonora está compuesta por un conjunto de sonidos simples, cada uno de ellos con su frecuencia e intensidad. En estas condiciones la onda sonora sigue siendo periódica, pero deja de ser sinusoidal. Para poder analizar cualquier vibración periódica se emplea un poderoso teorema matemático creado por Fourier.

El teorema de Fourier que dice [8]:

“Cualquier perturbación que se repita regularmente con un periodo  $T$ , puede analizarse como un conjunto de vibraciones sinusoidales de periodos  $T, T/2,$

$T/3, \dots$  con amplitudes seleccionadas de modo adecuado, es decir, mediante una sumatoria de términos formada por una frecuencia fundamental y todos sus armónicos.”

Es decir, si se representa una función periódica de frecuencia angular  $\omega = 2\pi/T$ , se puede expresar la función mediante un desarrollo en serie, de la forma [4,9]:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + \dots + A_n \cos(n\omega t) + \dots + B_1 \text{sen} \omega t + B_2 \text{sen} 2\omega t + \dots + B_n \text{sen}(n\omega t)$$

donde los coeficientes de Fourier (las  $A$ 's y  $B$ 's) son constantes por determinar. Las fórmulas para tal determinación son las integrales de Euler:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega t) dt$$

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \text{sen}(n\omega t)] \quad \text{Teorema de Fourier}$$

En general el número de términos del desarrollo de Fourier necesarios para representar una función es infinito pero muchas veces las amplitudes  $A$  y  $B$  decrecen muy rápidamente, por lo que el desarrollo puede reducirse a unos pocos términos.

Dependiendo de la naturaleza de la función que está siendo expandida, algunos términos pueden estar ausentes. Si la función  $f(t)$  es simétrica con respecto a  $f(t) = 0$ , el término constante  $A_0$  no existirá. Si la función  $f(t)$  es par,  $f(t) = f(-t)$ , entonces faltarían todos los términos seno. Una función impar  $f(t) = -f(-t)$ , causará la ausencia de todos los términos coseno. El término de menor frecuencia será:

$$B_1 = B_1 \text{sen}(\omega t)$$

tiene un periodo idéntico al de la vibración compuesta y recibe el nombre de vibración fundamental o primer armónico. Los demás términos corresponden a los armónicos superiores y tienen frecuencias que son múltiplos de la fundamental.

### 1.3.4. DEFINICIONES DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA ONDA

Las ondas sonoras son caracterizadas por los siguientes parámetros [1-3, 8-9,11]:

- **Amplitud:** Es la diferencia entre los valores máximos y mínimos del movimiento ondulatorio en un punto. Representa la variación de presión existente en ese punto.
- **Frecuencia:** Es el número de veces que un fenómeno (periódico) se repite a sí mismo por segundo. Es el inverso del periodo ( $T$ ). Las unidades de la frecuencia son Hertz (Hz), que representa el número de oscilaciones por segundo. Los materiales tienen una frecuencia natural (o fundamental) característica de ellos mismos, la cual depende de su rigidez y su masa, esta dependencia esta dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

En donde  $k$  es el coeficiente de rigidez del material dado en Newton por metro (N/m) y  $M$  es la masa del material (Kg).

Esta relación describe que la frecuencia natural es una función directamente proporcional a la rigidez del material e inversamente proporcional a la masa.

- **Velocidad:** Es la velocidad a la que viaja la onda sonora. Depende del medio donde se propaga y de la temperatura. Suponiendo que el aire es un gas ideal, la velocidad esta en función de la temperatura ( $T$ ) y se puede calcular como:

$$c_s = 331 + 0.6 \cdot T$$

Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases. Tanto en los líquidos como en los sólidos, la densidad tiene el mismo efecto que en los gases; la velocidad del sonido varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. La velocidad también varía de forma proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad.

Para sólidos se tiene:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

donde  $E$  es el módulo de Young (o elástico) y  $\rho$  es la densidad del medio.

Por ejemplo, para una placa se tiene:

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

siempre que la onda incida transversalmente, donde  $G$  es el módulo de rigidez de la placa y  $\rho$  su densidad.

Para líquidos se tiene:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

donde  $B$  es el módulo de volumen para el fluido y  $\rho$  su densidad.

Para gases se tiene:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Donde  $\gamma$  es la constante adiabática,  $P$  es la presión del gas,  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta del gas y  $M$  es la masa molecular del gas.

- **Longitud de onda:** Es la distancia perpendicular entre dos frentes de onda que tienen la misma fase. Esta longitud es la misma que la recorrida por la onda en un ciclo completo de vibración.

Se denomina con la letra griega lambda ( $\lambda$ ) y se relaciona con la frecuencia (en Hz) y con la velocidad del sonido (en m/s):

$$c = \lambda \cdot f$$

#### 1.4. ESPECTRO ACÚSTICO.

Se llama espectro acústico de un sonido compuesto a una representación de las amplitudes o de las intensidades relativas frente a las frecuencias de las ondas sonoras simples que lo componen. La percepción del sonido por el oído humano es un mecanismo complejo pero está determinada por cuatro cualidades que definen un sonido [2].

- Intensidad.
- Tono.
- Timbre.
- Evolución temporal.

#### 1.4.1. INTENSIDAD.

Desde un punto de vista objetivo está relacionada con la amplitud de la onda sonora y con la cantidad de energía transportada, que es lo medible del sonido (intensidad de un sonido), desde un punto de vista subjetivo (nos dice si el sonido es "alto o bajo"), determina la sonoridad del sonido.

Hay tres conceptos íntimamente ligados con la parte energética medible de la onda sonora:

- *Potencia sonora:* Es la emisión de energía acústica de la fuente por unidad de tiempo. La unidad de la potencia sonora está dada en Watts (W).

Por tanto, se puede hablar de Potencia Instantánea, que es la tasa a la que es radiada la energía en cualquier instante de tiempo; Potencia Máxima, es el valor máximo de potencia en cualquier instante de tiempo y Potencia Media, es el valor integrado de la potencia en un intervalo de tiempo determinado. Esta última suele ser mucho menor que la Potencia Máxima, puesto que el valor de potencia fluctúa en el intervalo del tiempo de medida.

- *Presión sonora:* No sólo depende de la potencia de la fuente, sino también de la distancia a ésta y de las características acústicas del espacio que la rodea. La unidad de medida es el Pascal.
- *Intensidad sonora:* La intensidad del sonido ( $I$ ) en una dirección específica de un punto del campo sonoro, se define como el flujo de energía sonora a través de una unidad de área en ese punto, siendo dicha unidad de área perpendicular a la dirección especificada ( $S$ ), por lo que:

$$I = \frac{P}{S} \quad (\text{Watts/m}^2)$$

siendo  $P$  la potencia sonora emitida por la fuente.

La respuesta del oído humano no es proporcional al valor absoluto del estímulo, sino que lo es a la relación entre el estímulo y un valor umbral. Debido a esto y a los amplios márgenes de potencia (de  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> a 1 W/m<sup>2</sup>) que se manejan en las ondas sonoras, se usa una escala logarítmica definida como escala de decibeles, que se detalla a continuación:

#### 1.4.1.1. DECIBELES (DB).

El decibelio es una unidad logarítmica de medida utilizada en la ciencia, planteado en principio como una magnitud que resulta de la relación de parámetros (tensión  $E$ , corriente  $I$ , potencia  $P$ , densidad de flujo  $B$ , ruido  $N$ , etc.). En general se usa como magnitud de medida cuando a uno de los parámetros de referencia se le asigna un valor unitario o constante. Normalmente el valor tomado como referencia es siempre el menor valor de la cantidad. En algunos casos puede ser un valor promediado aproximado.

En acústica, la mayoría de las veces el decibelio se utiliza para comparar la presión sonora en el aire con una presión de referencia. Este nivel de referencia tomado en acústica, es una aproximación al nivel de presión mínimo, que hace que nuestro oído sea capaz de percibirlo. El nivel de referencia varía según el tipo de medida que estemos realizando.

Como su nombre indica el decibelio es la décima parte del Bel (así nombrado en honor Alexander Graham Bell). El Bel es el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. No obstante esta unidad resulta demasiado grande por lo que se ha normalizado el uso de la décima parte del Bel, siendo el decibel o decibelio. Partiendo de que la intensidad acústica en el campo lejano es proporcional al cuadrado de la presión, se define el nivel de presión sonora como:

$$L_p = 10 \log (p/p_{ref})^2 = 20 \log p/p_{ref}$$

Siendo  $L_p$  el Nivel de Presión sonora;  $p$  la presión medida;  $p_{ref}$  la presión de referencia.

Como es fácil ver, el nivel de referencia siempre corresponde con el nivel de 0 dB:

$$L_p = 20 \log (0.00002/0.00002) = 20 \log(1) = 20 * 0 = 0 \text{ dB}$$

Por lo tanto en 0 dB tenemos el umbral de audición del oído humano, se supone que no es posible oír por debajo de este nivel, o sea variaciones de nivel en la presión del aire inferiores a  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

La razón por la que se utiliza el decibelio, es que se tendría que estar manejando números o muy pequeños o excesivamente grandes, con lo que la posibilidad de error sería muy grande al hacer cálculos. Además, también hay que tener en cuenta que el comportamiento del oído humano está más cerca de una función logarítmica que de una lineal, ya que no percibe la misma variación en las diferentes escalas de nivel, ni en las diferentes bandas de frecuencias.

#### 1.4.1.2. SISTEMA DE NOTACIÓN DEL DECIBELIO.

La notación permitirá la compresión de una escala o, expansión de la misma tal como se requiere para la simplificación de cálculos en donde se involucran cantidades muy grandes.

La definición del *Bel* es: la relación logarítmica de base 10 de dos potencias.

$$Bel = \log \frac{P_1}{P_2}$$

Es importante notar que:

$$\frac{20Watts}{10Watts} = \frac{200Watts}{100Watts} = 3.01dB$$

Esto es que 3.01 dB sólo significa una relación de 2 a 1 pero no revela ningún valor de potencia. El oído humano escucha la misma diferencia en el incremento de 1 a 2 Watts así como también entre 100 y 200 Watts.

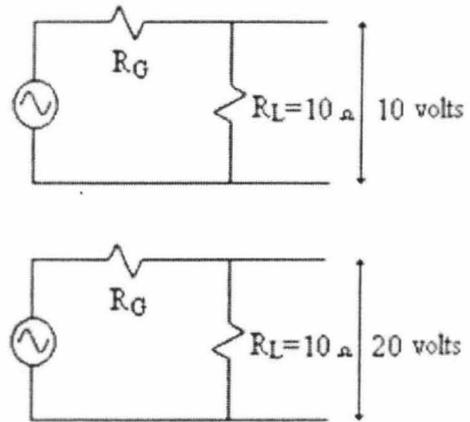
La *Tabla 1.1* muestra cómo incrementa la potencia con incrementos en los decibeles.

Incrementos de Potencia en Decibeles.	
Incrementos de Potencia	Decibeles
x	
2	3.01030
3	4.77121
4	6.02060
5	6.98970
6	7.78151
7	8.45098
8	9.03090
9	9.54243
10	10.0000
100	20.0000
1000	30.0000
10000	40.0000
100000	50.0000
1000000	60.0000

**Tabla 1.1:** Comparación del incremento en la potencia con el incremento logarítmico.

Una confusión común es el hecho de que al doblar el voltaje da como resultado un incremento de 6 dB, mientras que si se dobla la potencia sólo resulta un incremento de 3 dB.

La *Figura 1.4* muestra lo que pasa con el voltaje y potencia en el circuito cuando doblamos el voltaje.



**Figura 1.4:** Demostración de equivalencias en decibeles de voltaje y potencia.

Para el circuito 1 se tiene: 
$$P = \frac{(10V)^2}{10\Omega} = 10W$$

Para el circuito 2 se tiene: 
$$P = \frac{(20V)^2}{10\Omega} = 40W$$

Nótese que para un incremento del doble en el voltaje, la potencia se incrementa 4 veces.

Sin embargo, al verificar los incrementos se nota lo siguiente:

Para la potencia se obtiene: 
$$dB = 10 \log \frac{40}{10} = 6.02$$

Para el voltaje se obtiene: 
$$dB = 20 \log \frac{20}{10} = 6.02$$

Con esto, se puede afirmar también que el mismo incremento en decibeles para el voltaje corresponde al mismo incremento en potencia en decibeles.

Así, se tiene una expresión para las señales de voltaje que se registran:

$$dB = 20 \cdot \log \frac{V}{V_0}$$

En donde  $V_0$  es el valor mínimo registrado [3, 6].

El nivel de intensidad  $NI$  de un sonido de intensidad  $I$  está definido por:

$$NI = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}$$

Una razón por la que se utilizan escalas logarítmicas es porque la gama de intensidades audibles es muy grande, van desde aproximadamente  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  hasta  $10 \text{ W/m}^2$  y otra razón es como se dijo anteriormente, los humanos juzgan la sonoridad relativa de dos sonidos por la razón de sus intensidades que es un comportamiento logarítmico.

De manera general, sin entrar en detalles se puede decir que la intensidad y la presión efectiva de las ondas planas y esféricas están relacionadas por:

$$I = \frac{P_e^2}{\rho_0 c}$$

Donde:

$P_e$  es la presión efectiva,  $\rho_0$  es la densidad del medio y  $c$  es la velocidad de las partículas en el mismo medio. Por lo que las intensidades pueden representarse con expresiones de presión, que se llaman Nivel de Presión Sonora:

$$NPS = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

La referencia para los sonidos en el aire es:

$$I_{ref} = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

que es aproximadamente la intensidad de un tono puro de 1000Hz, el cual es apenas percibida por una persona con audición normal.

Debido a que los voltajes de salida de los micrófonos comúnmente usados en mediciones acústicas son proporcionales a la presión, la presión acústica es la variable que más fácilmente se mide en un campo acústico. Por esta razón, es mucho más común especificar niveles sonoros en términos de niveles de presión, que en términos de niveles de intensidad.

El oído no se comporta igual para el mismo nivel de presión en diferentes frecuencias. Por ejemplo, se toma un sonido lineal en el intervalo de 20 Hz a 20 KHz teniendo en todo el intervalo un nivel de 30 dB. Si el oído fuese lineal, se oirían con las mismas intensidades auditivas las frecuencias más graves, las intermedias y las agudas, sin embargo esto no es cierto, el oído humano tiene una menor sensibilidad en las frecuencias graves y agudas frente a las intermedias. Lo que más oiría, por tanto, son las frecuencias intermedias, después seguirían las graves y las que menos se escucharían serían las agudas.

#### 1.4.1.3. SUMA DE DECIBELES

Se ha visto que el decibelio es una función logarítmica y, por tanto, cuando se habla de dB de presión sonora no es posible sumarlos aritméticamente. Por ejemplo, 30 dB + 30 dB no es igual a 60 dB si no a 33 dB como se muestra a continuación.

Para poder sumar dos cantidades en decibelios podemos emplear la siguiente ecuación:

$$dB_1 + dB_2 = 10\log[10^{\frac{dB_1}{10}}] + 10\log[10^{\frac{dB_2}{10}}]$$

$$dB_1 + dB_2 = 10\log[10^{\frac{dB_1}{10}} + 10^{\frac{dB_2}{10}}]$$

$$30 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 10\log[10^{\frac{30}{10}} + 10^{\frac{30}{10}}]$$

$$30 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 10\log[10^3 + 10^3] = 10\log[2000]$$

$$30 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 33 \text{ dB}$$

La suma de dos cantidades en dB no puede ser más de 3 dB arriba del valor mayor de los dos. Si la diferencia que hay entre los dos valores a sumar es más

de 10 dB la suma no tiene valor práctico y se toma el valor mayor de las dos cantidades. Por ejemplo, si sumamos 20 dB + 10 dB el resultado será igual a 20 dB (aproximado). Solamente son significativos para la suma los valores que tienen una diferencia menor a 10 dB.

#### 1.4.2. TONO.

Es muy difícil encontrar en la naturaleza un sonido que esté compuesto por una única frecuencia, siendo por lo general una suma de frecuencias armónicas o de frecuencias múltiplos de la fundamental. A esta frecuencia fundamental o primer armónico, se le llama tono objetivo del sonido.

Los términos tono o altura se refieren a una cualidad de la sensación sonora que nos permite distinguir entre un sonido grave, de otro agudo. El tono se eleva al aumentar la frecuencia.

Se denomina melodía a un sonido que está compuesto por una sucesión de tonos de una determinada duración, y que tienen una determinada velocidad de cadencia, de forma que resulta agradable a la mayoría de los oyentes.

Cuando se realiza una mezcla de sonidos con tonos diferentes y simultáneos se produce una armonía; si la mezcla la forman sonidos cuyas frecuencias fundamentales guardan una relación numérica sencilla, la armonía será agradable y recibe el nombre de consonancia; en caso contrario forman lo que se llama una disonancia.

#### 1.4.3. TIMBRE.

El timbre es una cualidad subjetiva del sonido que sirve para distinguir dos sonidos con igual tono e intensidad, pero que tienen distinta forma de onda, es decir, distinta evolución temporal. El sonido no se compone de un único tono (onda sinusoidal en el tiempo), sino de la superposición de ondas sinusoidales simples que forman el espectro del sonido (excepto en el caso de los diapasones, que sólo producen un tono y por lo cual se utilizan como afinadores de instrumentos musicales). Haciendo un estudio espectral de la onda sonora, se diferencian de la siguiente manera.

- *Onda fundamental*, cuya periodicidad viene marcada por la frecuencia o tono fundamental.

- *Armónicos del fundamental*, son aquellos sonidos cuyo número de vibraciones mantienen entre sí una relación como la serie natural de enteros
- *Parciales*, que son componentes que no están en relación de múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

La misma nota procedente de dos instrumentos musicales diferentes, se distingue gracias al timbre, por ejemplo, el violín y el piano.

Los sonidos procedentes del medio ambiente son anárquicos y aleatorios, e incluirán los tres tipos de componentes anteriores a esta forma de sonidos se le conoce comúnmente como ruido, pero si los sonidos contienen una mezcla de frecuencias con una relación numérica entera, entonces no contienen la tercer componente de frecuencias parciales y serán sonidos consonantes (es decir que son armónicos).

Lo mismo que ocurre con el tono y la intensidad, el timbre depende fundamentalmente de la forma de onda pero también lo hace con la intensidad y frecuencia fundamental. Por eso en los equipos de alta fidelidad han de reproducir los discos al mismo nivel, con la misma velocidad y con la misma dinámica con la que se han ejecutado las obras en el momento de la grabación.

#### 1.4.4. EVOLUCIÓN TEMPORAL.

La secuencia con que se emiten o reciben los sonidos, así como la evolución en el tiempo que siguen sus intensidades, definen la forma de onda del sonido, y por tanto su contenido armónico.

#### 1.5. MECANISMOS DE PROPAGACIÓN Y FENÓMENOS.

La onda sonora se propaga por el medio sin sufrir ninguna alteración, siempre y cuando las dimensiones de la onda sean pequeñas en relación con las dimensiones del medio donde se propaga y, su comportamiento es semejante al de un rayo de luz; es por esto que identificamos muchas veces la onda sonora con *rayos sonoros* (cuya cuantización es llamada fonón) que representan el camino seguido por la onda sonora.

### 1.5.1. REFLEXIÓN.

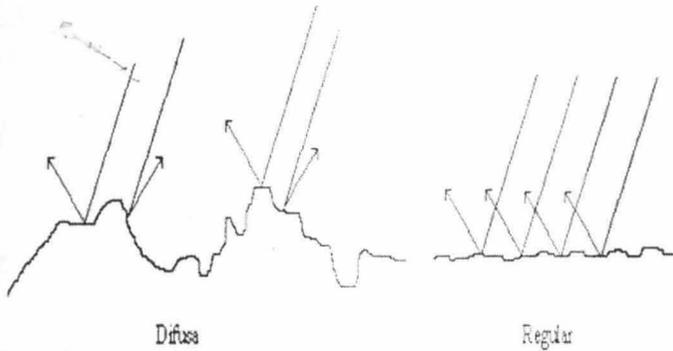


Figura 1.5: Tipos de reflexión de un haz sonoro.

Cuando la onda sonora encuentra en su camino un obstáculo con unas dimensiones mayores que su longitud de onda, el rayo sonoro tropieza contra él y se produce un *rebote*, que está gobernado por los mismos principios que la luz, en el cual el ángulo de incidencia del rayo con la superficie es igual al ángulo

formado por el ángulo reflejado y la superficie (*Ley de Snell*). La reflexión es una propiedad esencial para la atenuación del sonido. Para obtener una gran reflexión de sonido, la masa del medio aislante debe de ser mucho mayor a la masa del medio de propagación (considérese el aire). La masa de la pared de aislamiento puede ser incrementada con el uso de rellenos, tales como partículas y fibras.

Sin embargo, si se doblara el espesor de la pared aislante tan solo se obtendría una reducción adicional de 6 dB [7]. Es de uso común el usar materiales compuestos en lámina como paredes aislantes debido a su inhomogeneidad que presenta gran resistencia al paso de una onda acústica.

Existen dos tipos de reflexión: la difusa y la regular. La *Figura 1.5* muestra esquemáticamente los dos tipos de reflexiones.

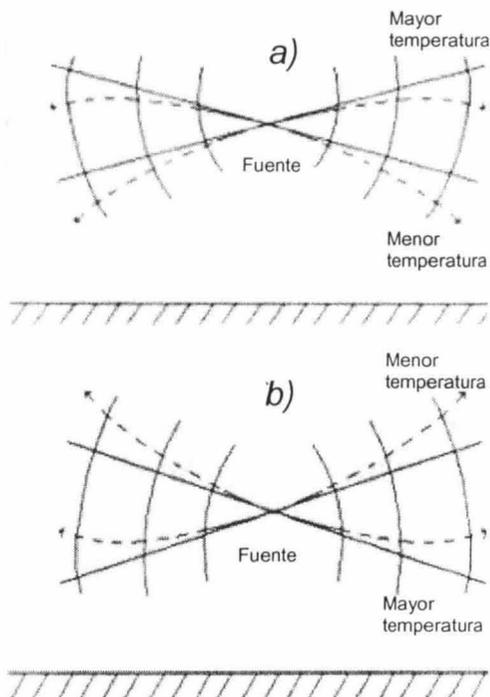
### 1.5.2. ABSORCIÓN.

Similar a la reflexión, la absorción acústica es una propiedad esencial para el aislamiento de ruido. Aquellos materiales cuya impedancia característica (o resistencia de onda, propiedad de un medio para resistir el paso de una onda, esta definida como  $Z=\rho c$ ) es igual a la del aire son los mejores materiales absorbentes. Las ondas de sonido que no son reflejadas, sí penetran en el medio aislante. Las ondas de sonido que penetran en un material polimérico son atenuadas de forma similar a las vibraciones mecánicas. En polímeros, los elastómeros y polímeros amorfos tienen la más alta absorción de sonido. En los materiales, la absorción de sonido tiene lugar al transformar las ondas

acústicas en calor. Puesto que los polímeros espumados tienen una impedancia del mismo orden que el aire, los hace unos malos reflectores de sonido. Esto los hace ideales para eliminar reflexiones (materiales muy absorbentes). Cuando se comparan con la madera, cualquier polímero (aun los semicristalinos) es considerado material con buenas propiedades acústicas.

### 1.5.3. REFRACCIÓN.

Los caminos que recorren las ondas generalmente no tienen la misma densidad y, por lo tanto, tampoco la misma temperatura (un cambio de temperatura implica un cambio en la densidad, por lo cual el único mecanismo que hace cambiar la velocidad de la onda es un cambio en la densidad) por lo que la onda sonora se desvía por ellos se van produciendo cambios de velocidad, lo que produce una curvatura de la onda debido a que la dirección del tren de onda va cambiando, este fenómeno que hace cambiar la dirección de la onda sonora se llama *refracción* del sonido. Muchas de las curiosidades en la propagación del sonido se deben a este mecanismo, por ejemplo, es la causa de que los sonidos lleguen más lejos en la noche (ambiente frío) que durante el día y que los sonidos también lleguen más lejos cuando tienen viento favorable.

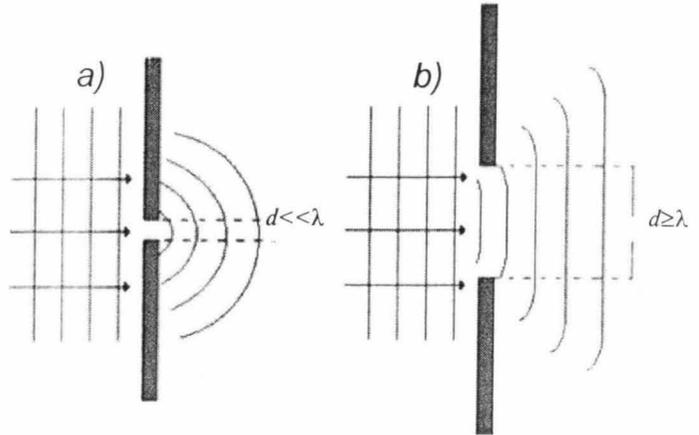


**Figura 1.6:** Refracción del sonido en ambiente a) frío alcanzando grandes distancias al refractarse hacia abajo y b) cálido en donde el sonido no puede recorrer grandes distancias pues se refracta hacia arriba.

lleguen más lejos cuando tienen

#### 1.5.4. DIFRACCIÓN.

Es un mecanismo debido a las irregularidades en las reflexiones. Cuando una onda sonora incide en una superficie que contiene irregularidades comparables con la longitud de onda, la reflexión no puede producirse limpiamente, ya que el ángulo con el que “ve” el frente de onda la superficie donde se refleja, no es el mismo, por lo que se produce una ruptura del frente;



**Figura 1.7:** Difracción de un frente de onda ante una ranura a) mucho menor a la longitud de onda, y b) mayor o igual a la longitud de onda.

esto combinado con los mecanismos de difracción hace que la onda resultante no sea única, produciéndose una dispersión de la energía en más de una dirección. Si la difracción es provocada por alguna ranura la cual es menor a la longitud de onda, la perturbación sufrirá una dispersión acentuada y simula la función de una fuente para el lado posterior. Pero cuando la ranura es de dimensiones comparables a la longitud de onda, el frente de onda mantiene su trayectoria sin mucha dispersión.

#### 1.5.5. INTERFERENCIA.

Cuando dos ondas de fuentes distintas llegan a juntarse en un mismo punto, ocurre el fenómeno de interferencia. Cuando las dos crestas de las ondas coinciden en el mismo punto, se dice que están *en fase* y su amplitud aumenta, esto es llamado **interferencia constructiva**. Cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, se dice que están *desfasadas*, y su amplitud disminuye, conociendo esto como **interferencia destructiva**.

Un caso particular de interferencia son las **ondas estacionarias**. Estas ondas se pueden producir en cualquier medio de propagación (ya sea sólido, líquido o gas) por medio de dos trenes de ondas (un tren de ondas es una onda considerada en una dimensión) de igual frecuencia que avanzan en el mismo medio pero en sentidos opuestos. Al generarse una onda a través del medio, tan luego alcanza una fase distinta, se refleja hacia atrás para encontrarse con las ondas sucesivas que siguen llegando. Si las ondas tienen la frecuencia correcta, la onda sustentará ambos trenes de ondas y se va a dividir en

secciones en las cuales se van a detectar los nodos (punto en la onda donde se cancela el movimiento de las partículas) y los antinodos (donde se suman los máximos de la intensidad de las dos ondas).

### *1.5.6. RESONANCIA.*

Cuando el espacio donde se desplaza la onda sonora no es muy grande comparado con la longitud de onda, la energía no se puede propagar, generando unas ondas estacionarias en el recinto, que se denominan modos de resonancia del recinto y que son las causantes de que se pueda propagar el sonido de baja frecuencia en las habitaciones pequeñas.

## CAPÍTULO II.

### MATERIALES Y MÉTODO.

#### 2.1. ANTECEDENTES.

A continuación se da una breve descripción de la matriz y el refuerzo usados para la fabricación del composito.

##### 2.1.1. FIBRA CORTA DE HENEQUÉN.

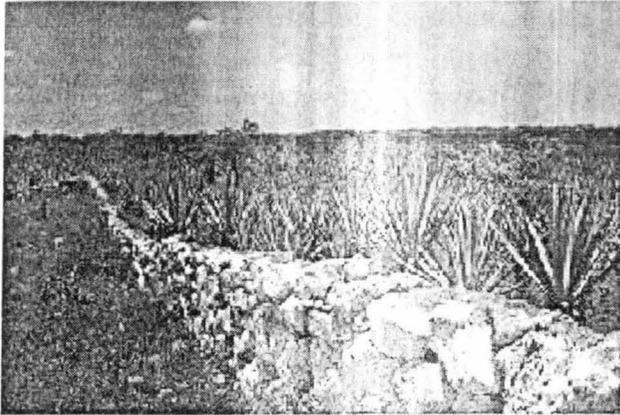


Figura 2.1: Agave precursor del henequén.

Por décadas, el henequén – *Agave fourcroydes*– (Figura 2.1) y otras fibras naturales han sido usados en diferentes productos como hilos, cuerdas, bolsas, sacos y alfombras. Sin embargo, la entrada de las fibras sintéticas al mercado y sus aplicaciones han sustituido a las naturales y, como consecuencia su aplicación ha disminuido. Hay varios campos donde las fibras naturales tienen un

uso potencial, uno de estos es como refuerzo de matrices poliméricas para la preparación de compositos.

La posibilidad de usar a la fibra de henequén como refuerzo es disminuida por la falta de conocimiento práctico acerca de sus propiedades físicas y mecánicas. El principal atractivo del henequén, una vez conociendo sus propiedades, es su dureza y resistencia. Es lo suficientemente fuerte para sostener grandes cargas de peso y no se rompe bajo circunstancias en las que las fibras sintéticas si lo hacen.

En el proceso de desfibrado las hojas cosechadas deben ser procesadas antes de las 24 horas de haber sido recogidas, para que la fibra se pueda limpiar de la manera debida. El descortezamiento antiguamente se realizaba machacando las hojas entre 2 piedras y eliminando la pulpa de la hoja, después las hojas eran descortezadas a mano entre un cuchillo y un bloque. En la actualidad las desfibradoras son automáticas y constan de 2 tamboras con cuchillas que al golpear a la hoja con gran velocidad separa la fibra, las más conocidas de estas máquinas son los modelos Corona, Robey y Stark Kirby. La fibra de henequén es separada de la hoja mediante máquinas que extraen la pulpa y al mismo

tiempo lavan la fibra en agua, posteriormente esta fibra se expone al sol de 1 a 3 días para secarla y blanquearla. También la obtención de la fibra es por separación mecánica, esto es debido a que las fibras, por su longitud y fuerza, pueden ser sostenidas firmemente mientras que el bagazo es eliminado. Se utilizan varios sistemas para el desfibrado entre los que se encuentran el Krupp Corona, que consiste en apretar por un extremo la hoja entre 2 cadenas de bronce, el sistema STARK, en el cual las hojas se sujetan entre 2 sogas y el sistema llamado siglo XX que utiliza una cadena de cobre y una polea para sujetar las hojas y ser introducidas en el tambor batiente, el cual está provisto de cuchillas que giran velozmente y comprimen las hojas contra un perchero o silla, protegido por una plancha de desgaste. En los 3 sistemas, al golpear las cuchillas las hojas de henequén por el efecto del machacado y raspado, se separa la pulpa de la fibra, este proceso es ayudado por un chorro de agua a presión. La capacidad de estas máquinas es de alrededor de 600 hojas por minuto para producir una tonelada de fibra por hora aproximadamente, aunque esta cifra varía según la calidad de la hoja que se desfibra [28].

Un análisis químico del henequén indica que su principal componente es la celulosa (59%), seguida por la hemicelulosa (28%) y la lignina (8%). El arreglo estructural de la fibra de henequén pone a las fibras de celulosa como a la parte rígida, por lo que sus propiedades mecánicas son una consecuencia de las fibras de celulosa, la lignina actúa como un aglutinante que une a las fibras de celulosa.

En este estudio, las fibras usadas se obtienen dividiendo a la fibra larga en tres segmentos de longitudes iguales y tomándose únicamente el segmento central de la fibra. En el trabajo de *M. N. Cazaurang et al* [22] se muestra que la fibra de henequén va disminuyendo su diámetro y cambiando la forma de la sección transversal que inicia en forma de viga y su espesor es mayor, en su centro es elíptica y su espesor disminuyó y, en la punta es circular y delgada. De estos análisis, se obtuvo que el segmento donde se presentan las propiedades físicas más uniformes es el que se encuentra en la parte media de la fibra.

### *2.1.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).*

El polietileno de alta densidad, también llamado lineal, es un termoplástico que se obtiene a partir de la polimerización por iniciador Ziegler-Natta, difiere estructuralmente del obtenido por polimerización por radicales (polietileno de baja densidad o ramificado). Por tener una estructura muy simple, la más simple de todos los polímeros comerciales es un material muy versátil. Una

molécula del polietileno es únicamente una cadena de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono.

Los lineales resultan en una cristalinidad y densidad más altas, y una temperatura de fusión cristalina mayor para polietilenos lineales.

Al compararse con el polietileno de baja densidad, el polietileno de alta densidad presenta un incremento en fuerza tensil, rigidez, resistencia química y un uso a temperaturas mayores, combinado con una baja en su resistencia al impacto a bajas temperaturas, elongación, permeabilidad y resistencia al “*stress cracking*”.

El polietileno lineal se produce normalmente con pesos moleculares en el rango de 50.000 a 250.000, pero puede ser mayor aún. El polietileno con pesos moleculares de 0.25 – 1.5 millones es llamado polietileno de alto peso molecular (HMWHDPE) y es usado en tuberías de alta presión en minería, industrias, petróleo, gases, etc. También existe otro tipo de polietileno que es de >1.5 millones y se denomina polietileno de peso molecular ultra-alto (UHMWHDPE). Este polietileno tiene una resistencia a la abrasión y fuerza al impacto muy altas, más altas que cualquier otro termoplástico y se puede utilizar para hacer fibras que son tan fuertes que sustituyen al Kevlar para su uso en chalecos a prueba de balas. Grandes láminas de éste se pueden utilizar en lugar de hielo para pistas de patinaje.

La mayoría de los polietilenos de alta densidad comerciales tienen un peso molecular numeral de 50,000 – 250,000. Estos materiales son usados en una amplia gama de aplicaciones. El mercado mas grande (40%) consiste en productos moldeados por soplado tales como botellas (para leche, alimentos, detergentes), utensilios de cocina y juguetes. Los objetos moldeados por inyección constituyen alrededor del 30% del mercado total. Los productos extruídos comprenden la mayoría del mercado restante para el HPDE. Esto incluye la fabricación de películas para envoltura de alimentos y bolsas de supermercado y empaques de alimentos, procesado en placas delgadas (hojas) se usa como tapetes de auto, maletas, tuberías, alambre y cable [10].

## *2.2. DESCRIPCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES.*

Como matriz polimérica se usó polietileno de alta densidad (HDPE) proporcionado por Union Carbide Corp. La fibra de henequén fue proporcionada por DESFIYUSA (Desfibradora Yucateca S.A.), como carga se usó  $\text{CaCO}_3$  malla 100 proporcionado por Técnica Mineral S.A. de C.V. Guadalajara, Jal., el NaOH para los tratamientos superficiales fue proporcionado por Técnica Química S.A., el agente acoplante usado fue el vinil tris(2-metoxi-etoxi)silano (Silano A-172) fue proporcionado por Union Carbide.

## *2.3. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DE LAS FIBRAS.*

Para modificar la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz se hicieron dos tratamientos superficiales a las fibras [13].

### *2.3.1. TRATAMIENTO CON SOLUCIÓN ALCALINA.*

Las fibras fueron tratadas en una solución acuosa al 2% en peso de NaOH con agitación durante una hora a 25°C, posteriormente fue lavada con agua destilada hasta que todo el NaOH fue eliminado y esto es hasta que alcanzó un pH de 7, subsecuentemente las fibras fueron secadas en un horno a 60°C durante 24 hrs. La finalidad de este tratamiento es la de eliminar grasas, ceras, hemicelulosa, lignina y demás impurezas presentes en forma natural en la superficie de la fibra de henequén que evitan la creación de puntos de enlace interfacial por ser inertes a la matriz, además de limpiar a la fibra, la solución alcalina modifica físicamente a la fibra al hacerla más rugosa para una mejor interfase de tipo mecánica.

### *2.3.2. TRATAMIENTO CON SILANO.*

Es preparada una solución al 1% de silano A-172 y 0.5% de peróxido de dicumilo en una mezcla de metanol-agua (90/10 en peso) con un pH ajustado a 3.5 con ácido acético y agitado continuamente durante 10 min. Las fibras tratadas previamente con la solución alcalina, son sumergidas en esta solución y agitadas durante 1 hr. Después las fibras son secadas en un horno a 60° C

durante 24 hrs. La fibra con este proceso se logra insertar en su superficie grupos funcionales de organosilano que también son compatibles con la matriz, fortaleciendo de esta forma a la interacción que se crea por estos enlaces.

### 2.3.3. TRATAMIENTO DEL $\text{CaCO}_3$ .

El carbonato de calcio es tratado con aceite mineral como ayuda de proceso y Titanato (Isopropil, triisostearyl titanato proporcionado por Kenrich Petrochemicals, Inc.) como agente acoplante, se hizo la mezcla del titanato y el aceite mineral y, posteriormente, en una mezcladora de cintas se incorporó esta mezcla con el  $\text{CaCO}_3$  y se mantuvo agitando durante 20 minutos, hasta que todo el  $\text{CaCO}_3$  quedo impregnado con la mezcla de aceite y titanato. Posteriormente se metió en un horno a  $60^\circ \text{C}$  durante 24 hrs. para su secado y buena dispersión al formular el material y evitar su aglomeración [12]. El propósito del  $\text{CaCO}_3$  como relleno es el modificar la rigidez del material.

### 2.4. MATERIAL COMPUESTO.

Se elaboraron 3 tipos de materiales, uno con fibra sin ningún tipo de tratamiento (*ST*), otro con fibra tratada en solución alcalina (*NaOH*) y el tercero con fibra tratada con silano (*SIL*).

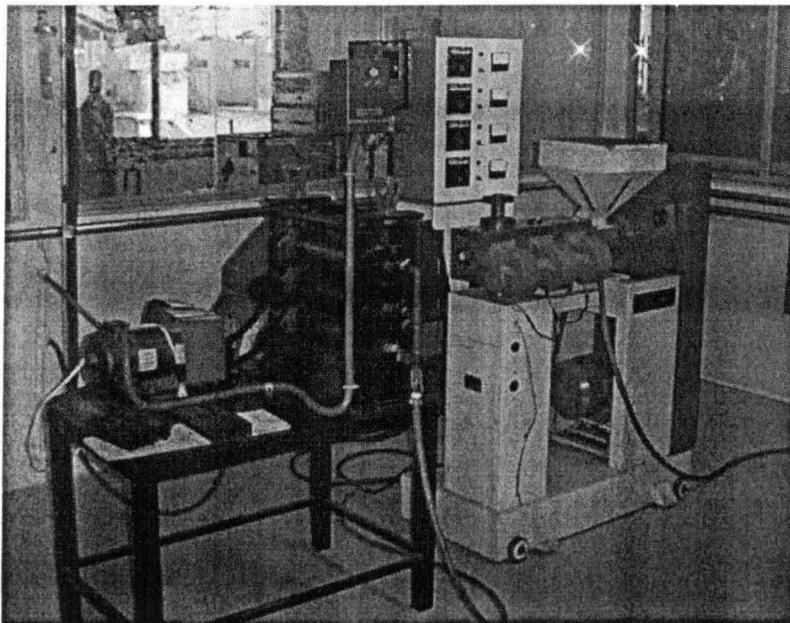


Figura 2.2: Extrusor Nieto y calandra de 3 rodillos

Los materiales contienen 50% de resina de polietileno de alta densidad, 30% de fibra y 20% de  $\text{CaCO}_3$ , para darle coloración se usó un 2% en peso de pigmento mineral marrón.

Las formulaciones fueron extruídas primeramente en barras y peletizadas para homogeneizar a las formulaciones de los

materiales, posteriormente se procesaron en láminas en un extrusor Nieto con las siguientes temperaturas: zona de alimentación 160°C, zona de fundido 170°C, zona de compresión 180°C y dado formador 180°C. Del dado se hicieron pasar por una Calandra horizontal de 3 rodillos para darle un acabado uniforme al laminado. Se obtuvieron láminas de un espesor promedio de 2.5 mm y un ancho promedio de 22 cm.

De las láminas obtenidas se cortan las placas y probetas para realizar las pruebas de que es propósito este trabajo.

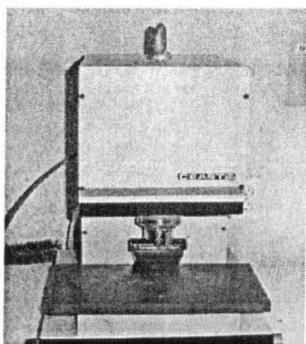
Para las pruebas a tensión, se cortan las probetas Tipo IV de acuerdo a la norma ASTM Standard D 3039-76 para resinas reforzadas con fibras. Las probetas que se cortaron longitudinalmente son categorizadas en extremo 1, extremo 2 y centro, y se cortan también en forma transversal.

Para el estudio de la capacidad de aislamiento acústico se cortan placas de 10×20 cm. En dirección del flujo de extrusión se cortan placas laterales y centrales, y en forma transversal.

## 2.5. EQUIPO.

A continuación se describen lo equipos y dispositivos usados para la realización de este trabajo.

### 2.5.1. CORTADOR NEUMÁTICO.



Las probetas Tipo IV para los experimentos de EA se hicieron con un cortador neumático CEAST 6051/00.

Figura 2.3: Cortador neumático.

### 2.5.2. MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSALES.

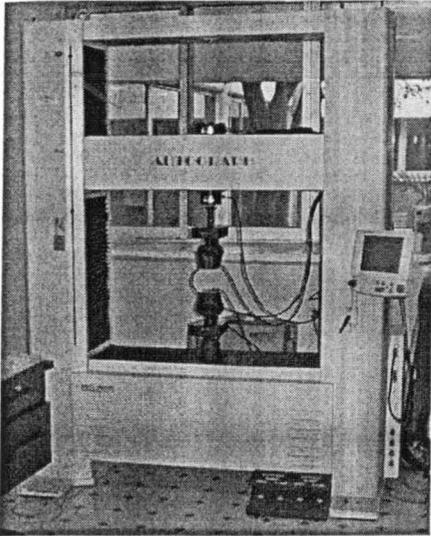


Figura 2.4: Máquina de pruebas universales

Para las pruebas a tracción se usó una máquina de pruebas universales Shimadzu AG-I con capacidad de 100 KN, y una celda de carga de 5 KN. Se empleó una rapidez de deformación de 0.5 mm/min para obtener un espectro más amplio y definido.

### 2.5.3. EQUIPO DE EMISIÓN ACÚSTICA.

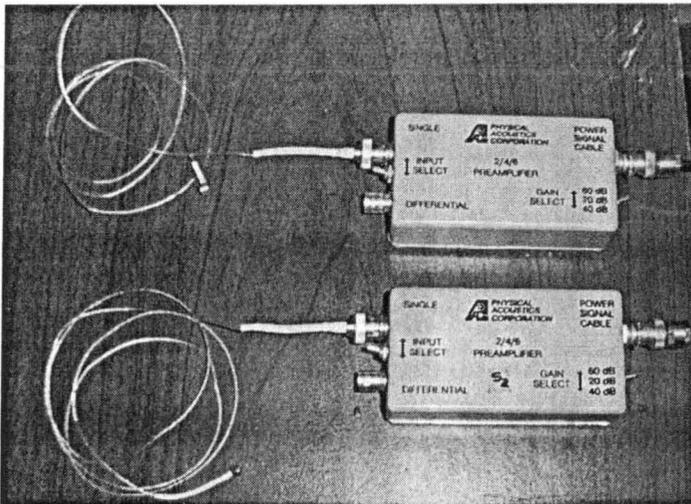
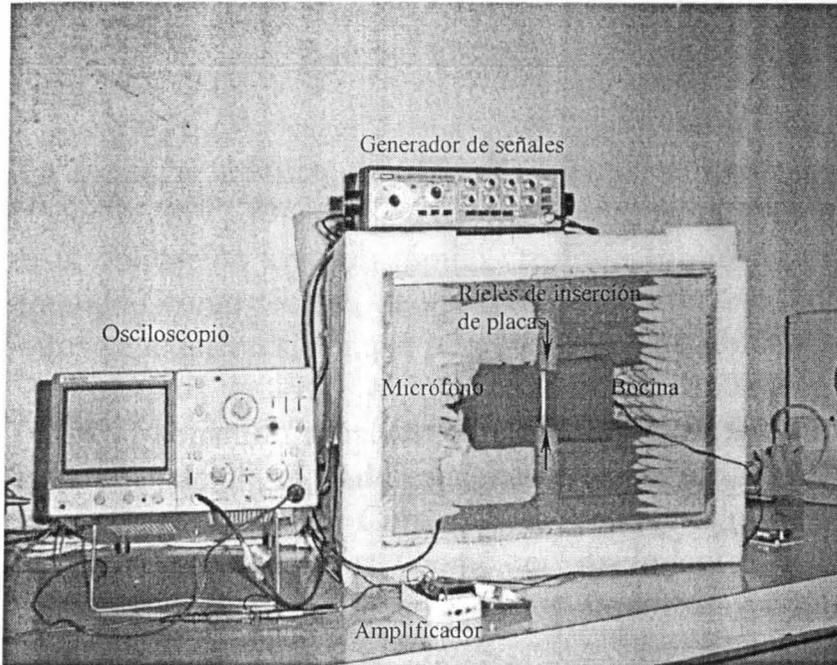


Figura 2.5: Sensores piezoeléctricos y preamplificadores usados en las pruebas de EA.

de datos analógica-digital de dos canales AEDSP-32/16B de la *Physical Acoustics Corporation*. El procesamiento de los datos fue efectuado en el programa *Mistras-2001* Ver. E3.40. En los preamplificadores se usó una ganancia de 60 dB.

Complementando las pruebas de tracción, se usaron transductores piezoeléctricos PICO de 6 mm de diámetro, con un intervalo de frecuencias de 20 Hz a 1 MHz y una frecuencia pico de calibración de 493.75 KHz conectados a preamplificadores para captar y amplificar las señales de todos los eventos ocurridos al ser cargadas las probetas. Estos eventos son registrados por una tarjeta de adquisición

#### 2.5.4. EQUIPO DE ATENUACIÓN ACÚSTICA.



**Figura 2.6:** Sistema para la caracterización del Aislamiento Acústico de placas.

Se construyó una caja anecoica, de estructura de madera y forrada en su interior con espuma de poliestireno el fondo, las paredes y el techo. El exterior se forró con espuma de poliuretano. La espuma de poliestireno usada en el interior tenía una superficie de pirámides y huecos como se ve en la Figura 2.6, dando una mayor

destrucción de las ondas incididas en las paredes y así, evitando la reflexión y creación de ruido en el interior.

Una vez forrada, se le instaló un marco con riel con un espacio de 10×20 cm diseñado para la fijación de las placas.

Finalmente se ajustó una bocina de un lado del marco y un micrófono del otro. Se instaló un generador de señales modelo 3020 de frecuencia máxima de 2 MHz de la DYNASCAN CORPORATION a la bocina y al canal 1 de un osciloscopio KIKUSUI cos 5040 de 40 MHz de 2 canales.

El micrófono fue conectado a un amplificador con amplificación de señal 20x y este fue conectado al canal 2 del osciloscopio.

## *CAPÍTULO III.*

### *CARACTERIZACIÓN POR EMISIÓN ACÚSTICA.*

#### *3.1. ANTECEDENTES.*

La emisión acústica es utilizada científicamente desde los años cincuenta, época en la cual se realizaron los primeros ensayos sistemáticos de tracción. Esta aplicación tuvo un rápido crecimiento en sus primeros años, casi en su totalidad como técnica de ensayos no destructivos, con claras ventajas sobre otras ya existentes, ya que permite detectar y ubicar fallas activas.

A principios de 1950, el investigador alemán Joseph Kaiser observó que un material sometido a esfuerzos emite sonidos, al usar ciertos transductores e instrumentación, él pudo escuchar esos sonidos de alta frecuencia inaudibles para el ser humano. Con esto se demostró que algunos defectos críticos pueden ser detectados, como el nacimiento y propagación de grietas microscópicas. Esta tecnología es conocida comúnmente como emisión acústica (*EA*).

Con el paso del tiempo, su uso cobró más importancia y actualmente se puede afirmar que en la última década, sus aplicaciones se han ampliado a muchas otras áreas, que van desde la caracterización de recubrimientos, ubicación de fisuras, hasta la detección y localización de fallas. Existen aplicaciones en medicina y en máquinas herramientas, en este último se detectan las señales generadas por el desgaste y se puede correlacionar el estado de la herramienta. En los últimos años han sido publicados una gran cantidad de trabajos en cementos y materiales compuestos. Sin embargo, a pesar de los adelantos, la emisión acústica no se encuentra lo suficientemente difundida.

La fuente de la energía de emisión acústica es el campo de tensión elástico en el material. Si el material no está sometido a tensión, no habrá emisión. Es por eso que las inspecciones de emisión acústica se llevan a cabo durante pruebas a tensión o cuando alguna estructura en servicio esté sometida a una carga.

La emisión acústica es un fenómeno natural que ocurre en un amplio intervalo de tipo de materiales, estructuras y procesos. Las emisiones acústicas de más grande escala son los movimientos sísmicos y, los más pequeños que se han detectado son los correspondientes a dislocaciones en metales sometidos a tensión. Existe un amplio intervalo de estudios de laboratorio y pruebas industriales.

El equipo de emisión acústica es altamente sensible a cualquier tipo de movimiento dentro de su intervalo de frecuencias (típicamente de 20 Hz a

1200 KHz). El equipo no solo detecta crecimiento de grietas y deformación del material, también es capaz de detectar otro tipo de procesos [20] como:

- Monitoreando *en-proceso*.
- Detectando la precisión y el desgaste de maquinaria automática.
- Detectando desgaste y pérdida de lubricación en equipo rotatorio.
- Detectando partes o partículas que no están ajustadas.
- Detectando y monitoreando fugas, cavidades y flujo.
- Monitoreando reacciones químicas como procesos de corrosión, transformaciones líquido-sólido, y transformaciones de fase.

### 3.2. GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE ONDAS DE EMISIÓN ACÚSTICA.

Cuando en un material compuesto ocurre una redistribución de esfuerzo a nivel local, se emiten ondas sonoras de alta frecuencia. Esta redistribución local del esfuerzo, en general, es causada debido a cambios estructurales del material durante condiciones de carga.

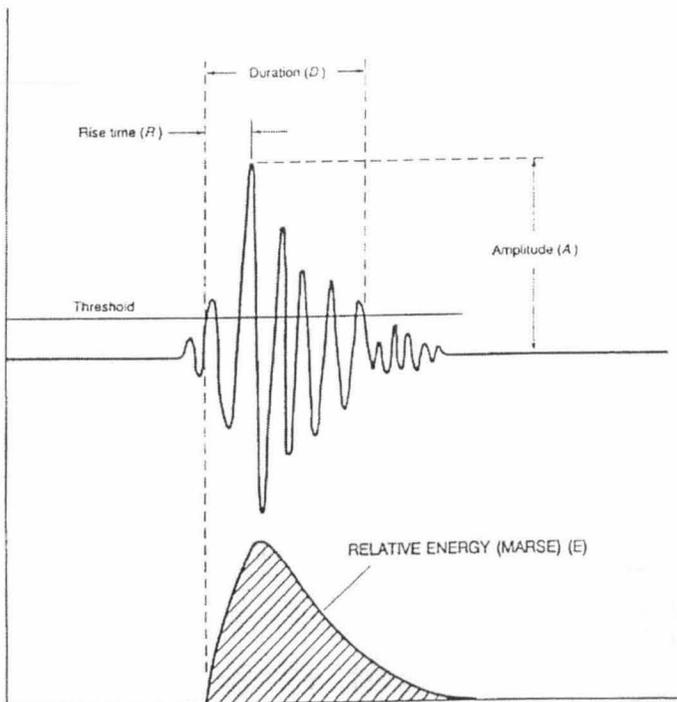
La emisión de ondas sonoras o emisión acústica, se define como la generación de vibraciones elásticas debido a la rápida liberación de energía desde la

fuerza localizada dentro del material, esta fuente se crea durante la deformación, o sea, durante la redistribución de los componentes del compuesto.

Estas ondas sonoras son fácilmente detectadas por sensores piezoeléctricos colocados en la superficie del material compuesto.

La ventaja de esta técnica, es que provee una completa información de los sitios donde ocurre la fuente sonora [19-20].

Una onda típica de emisión acústica se muestra en la *Figura 3.1*, definiéndose los parámetros que la



*Figura 3.1:* Señal obtenida por emisión acústica y sus parámetros.

caracterizan. El “*threshold*” es el umbral donde los eventos mayores a él son

registrados y los eventos por debajo se consideran ruido y no se registran, el estándar para pruebas de EA es de 35 dBae en el cual se contemplan los ruidos debidos al reacomodo del material entre las mordazas y el ruido de fondo de la máquina. La *amplitud* es el pico de voltaje más alto registrado en un evento, este parámetro está directamente relacionado a la magnitud de la fuente del evento y puede variar en un gran intervalo, de  $\mu\text{Volts}$  a Volts. Los *conteos del evento* son la sumatoria de los pulsos que tienen valores mayores al *threshold*. Este parámetro es una forma fácil de cuantificar una señal de EA. Los conteos dependen de la magnitud de la fuente del evento, pero también dependen de las propiedades acústicas del espécimen. La *energía de conteo* (o relativa) es el área bajo la envolvente de la señal, es una medición de la magnitud y es más sensible a la amplitud y a la duración del evento. La *duración de evento* es el tiempo medido desde el primer conteo de evento hasta el último registrado, directamente medido en microsegundos, este parámetro depende de la magnitud de la fuente acústica estructural y reverberación. Es importante para el reconocimiento de fuentes ligadas a procesos de larga duración y para la filtración de ruido y otros tipos de señales ajenas. El “*rise time*” es el tiempo medido desde el primer conteo registrado hasta el pico mas alto de la señal.

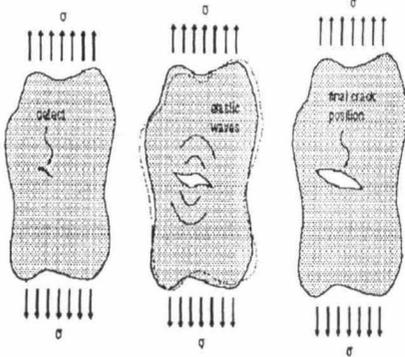


Figura 3.2: Representación esquemática de la emisión de ondas acústicas por fallas microestructurales de un material

materiales compuestos, son defectos relacionados a procesos de deformación, tales como propagación de grietas y deformación plástica (Figura 3.2). Ésta se propagará en la superficie del espécimen donde puede ser detectada por detectores apropiados.

En un material compuesto, la falla de la fibra dentro de la matriz resulta en un cambio repentino del estado de esfuerzos, esto está asociado a la variación de la energía almacenada en el composito. Una fracción de esta energía está relacionada al comportamiento de la onda que se propaga por el material.

Las principales fuentes de emisión acústica en

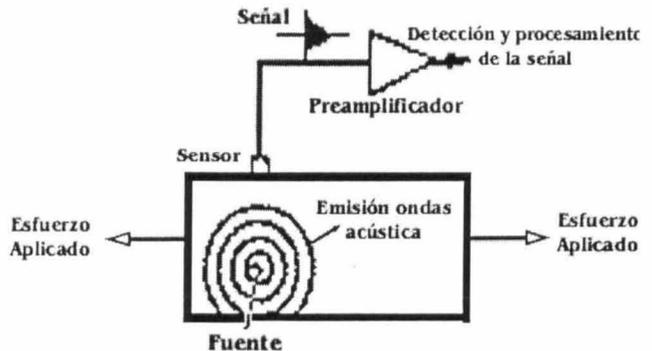


Figura 3.3: Principio básico del método de registro y medición de emisión acústica

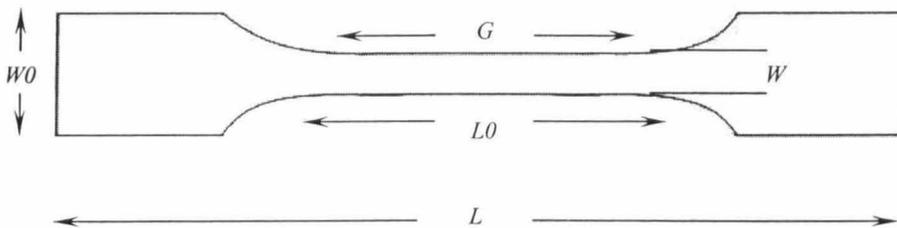
En la *Figura 3.3* se ilustra el proceso de generación y detección de la señal de emisión acústica. Aquí se puede apreciar cómo un espécimen al ser sometido a un esfuerzo, genera una fuente de emisión acústica que se propaga a través del material en forma esférica y es registrada por el sensor piezoeléctrico fijado a su superficie, transformando la señal mecánica en eléctrica. Esta señal es muy débil, por lo que debe de ser sometida a un sistema de amplificación.

La caracterización con *EA* en materiales compuestos reforzados con fibras, ha probado ser muy efectivo cuando se compara con otros métodos no-destructivos. Sin embargo, la atenuación de las señales de *EA* en materiales reforzados con fibras presenta problemas únicos, debido a los diferentes componentes que lo forman, ocasionando una mayor atenuación de las emisiones acústicas que se generan en su interior, siendo en algunos casos la anulación total de la onda, al menos los sensores no alcanzan a registrarla. La *EA* para este tipo de materiales requiere de un espaciado menor entre sensores al que se usa en componentes metálicos, de tamaño y configuración similares. Con las debidas consideraciones, la *EA* para materiales reforzados con fibras, es altamente efectivo en la detección y localización de los puntos de rompimiento de la fibra, delaminación, rompimiento interfacial y otros tipos de degradación estructural.

### 3.3. EXPERIMENTAL.

Los tres materiales utilizados se cortan en probetas Tipo IV (ASTM Standard D 3039-76 para resinas reforzadas con fibras) para ser sometidas a tensión en la máquina de pruebas universales.

Las dimensiones son:



- $G = 25 \text{ mm}$
- $L = 115 \text{ mm}$
- $LO = 33 \text{ mm}$
- $W = 6 \text{ mm}$
- $W_0 = 19 \text{ mm}$

Se colocan dos piezoeléctricos en el material separados 25 mm entre ellos, esto, con el fin de poder localizar el punto de falla, ya que el tiempo que tarda

la onda acústica en ir desde su fuente hasta cada uno de los piezoeléctricos será diferente. Esta diferencia de tiempos está directamente relacionada con la posición de la falla respecto al mismo material. Los dos transductores se impregnaron con grasa de silicón y fueron fijados con ligas al material, con el objetivo de evitar la fricción entre el material y el transductor, ya que esto ocasionaría un ruido indeseable. Por cada material se cortaron 30 probetas, 10 de cada región longitudinal (lado 1, centro y lado 2).

De trabajos anteriores en este tema, se sabe que las señales aparecen a intervalos definidos, característicos del tipo de falla que se presente [14-17], así los intervalos se pueden identificar de la siguiente manera:

- A. Las primeras señales corresponden a la falla de la fibra, que ocurre a grandes amplitudes, bajas frecuencias (o alta duración de evento). En general hablar de bajas, medianas y altas frecuencias en este tipo de experimentos será relativo al intervalo de frecuencias en el cual ocurran las fallas de todos los componentes del composito (fibra-interfase-matriz).
- B. El modo de falla de la matriz es correlacionado a eventos de baja amplitud, alta frecuencia (o baja duración de eventos).
- C. Y el tercer modo de falla es el del rompimiento interfacial, el cual sucede a amplitudes intermedias-bajas y bajas frecuencias (eventos de gran duración).

De los ensayos a tensión de las probetas, se obtuvieron gráficos de *esfuerzo-deformación* y los correspondientes gráficos de emisión acústica: *amplitud-tiempo*, *frecuencia-tiempo*, *conteo de eventos-tiempo*, *frecuencia-amplitud* y *duración de eventos-amplitud*.

Los gráficos de *conteo de eventos-tiempo*, *amplitud-tiempo* y *frecuencia-tiempo* son correlacionados con el gráfico de *esfuerzo-deformación* para determinar qué componente del composito falla. Esta correlación puede hacerse ya que la deformación se efectuó a una rapidez constante de 0.5 mm/min.

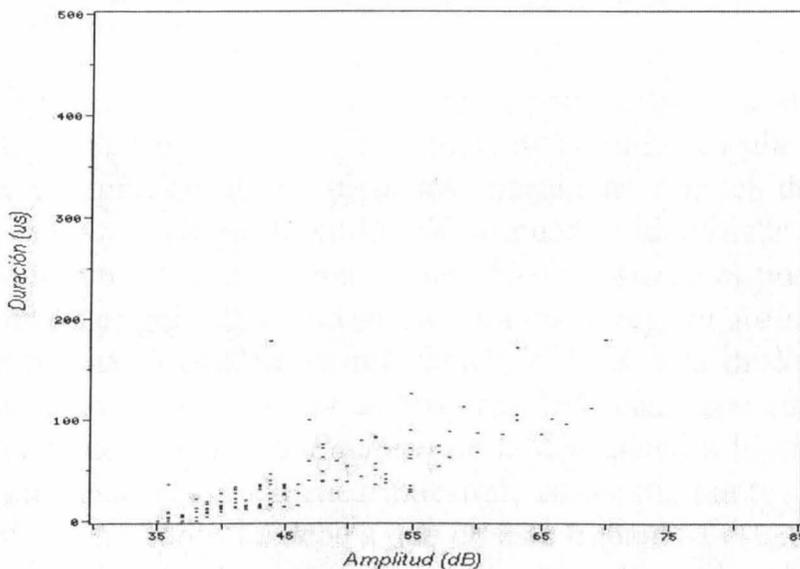
Los intervalos característicos de cada componente, se observan claramente en los gráficos de *Duración de evento-Amplitud*, una vez determinadas las zonas es posible pasar a los gráficos de *frecuencia-Amplitud* y determinar los intervalos detectados anteriormente. Teniendo presentes los puntos A, B y C antes mencionados, se observa que la falla de la matriz, en general, ocurre en

el dominio de amplitudes entre 35 y 47 dB, con duraciones de evento menores a 40  $\mu$ s. La falla de la interfase ocurre en el dominio de amplitudes entre 47 y 60 dB, con duraciones de evento menores a 100  $\mu$ s. La falla de la fibra y rompimiento del material ocurren en el dominio de amplitudes entre 60 y 80 dB, con duraciones de evento mayores a 100  $\mu$ s.

Cuando los componentes dentro del material compuesto fallan, cada uno de ellos lo hará en intervalos de tiempos distintos. En un gráfico de propiedades mecánicas, después de haber pasado la zona de deformación elástica, las primeras señales que aparecen corresponden a la falla de las fibras a bajas frecuencias (alta duración de eventos), menores a 1 KHz. Las señales de la falla de la interfase, en general, aparecen en la zona de deformación plástica. En la región media de la falla interfacial se registrarán el inicio de grietas en la matriz y su propagación. Finalmente, las señales de la falla generalizada de la matriz, aparecen en la ruptura del material cuando el refuerzo ya no es capaz de soportar más carga.

### 3.5. ANÁLISIS DEL MATERIAL SIL.

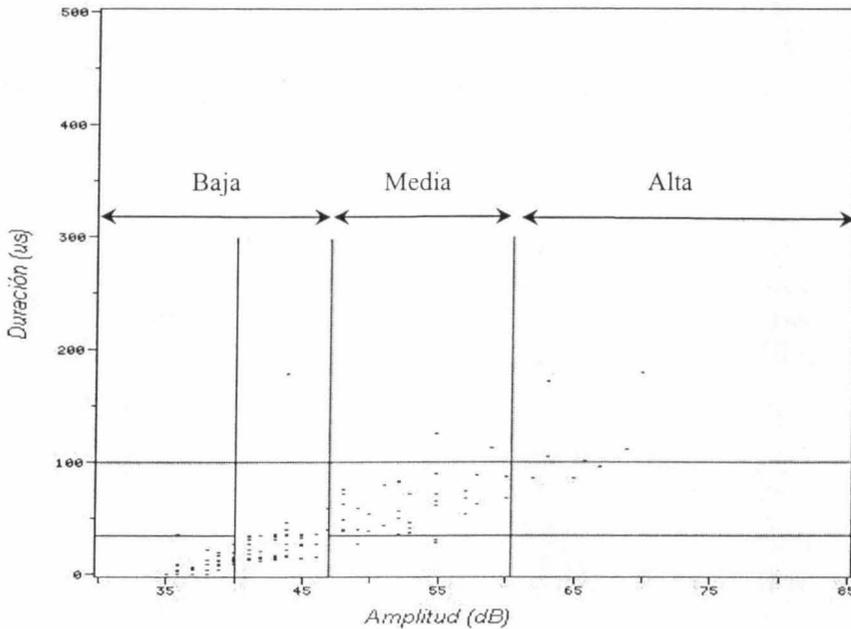
El análisis de emisión acústica, en general, se realiza graficando la duración del evento acústico como una función de la amplitud. En este tipo de gráficos, se pueden definir algunos dominios, los cuales pueden ser correlacionados con



**Figura 3.4a:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud.

los daños físicos causados al compuesto durante pruebas de tensión.

Los gráficos que se presentan, corresponden a una sola repetición de un tratamiento, pero son representativos de todas las repeticiones realizadas al material compuesto. Esto se debe a la imposibilidad de poder obtener los datos tabulados para poder promediar y determinar la desviación estándar. Ya que el *software* solo permite imprimir cada gráfico por separado. Haciendo un análisis visual de todos los gráficos de repetición de cada material compuesto.



**Figura 3.4b:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

La *Figura 3.4a*, muestra el gráfico correspondiente a la muestra 01 del material SIL corte central. Usando el método de multi-escala que permite la correlación del gráfico de propiedades mecánicas con el de *duración de eventos acústicos vs amplitud* en donde se pueden identificar claramente los modos de falla presentado por los autores *Siron y Tsuda* es posible dividir en cuatro dominios el gráfico, como se muestra en la *Figura 3.4b*. En este caso, solo se tienen cuatro cuadrantes relevantes, a diferencia de lo mostrado por *Siron y Tsuda* en su trabajo con un material reforzado con fibra de carbono [33], y en el estudio de *Pérez-Pacheco* de la degradación higroscópica de un material compuesto [32], quienes muestran cinco cuadrantes relevantes. La falta del quinto cuadrante, se debe a que en este trabajo se está utilizando fibra corta de henequén, por lo que no hay rompimiento de la fibra durante los ensayos de tracción, o que ocurra en un porcentaje extremadamente bajo.

El primer dominio, se asocia con la creación de grietas en la matriz y el inicio de su propagación, el segundo a la propagación de las grietas en la matriz, el

tercero se asocia a la ruptura de las interfases fibra-matriz y carbonato-matriz y el cuarto dominio se asocia a la ruptura del material como un todo. Debido a que el material no es homogéneo a lo ancho de la cinta, se analizaron tres zonas: *Centro*, *Lado 1* y *Lado 2*. En las siguientes tablas se presentan los diferentes dominios correspondientes a cada uno de los tres materiales y cada una de las zonas de las cintas extruídas.

<i>Material SIL (Centro)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 38 dB)	(38 – 47 dB)	( 47 – 60 dB)	( 60 – 80 dB)
Baja (< 35 $\mu$ s)	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (35 – 100 $\mu$ s)				
Alta (>100 $\mu$ s)				

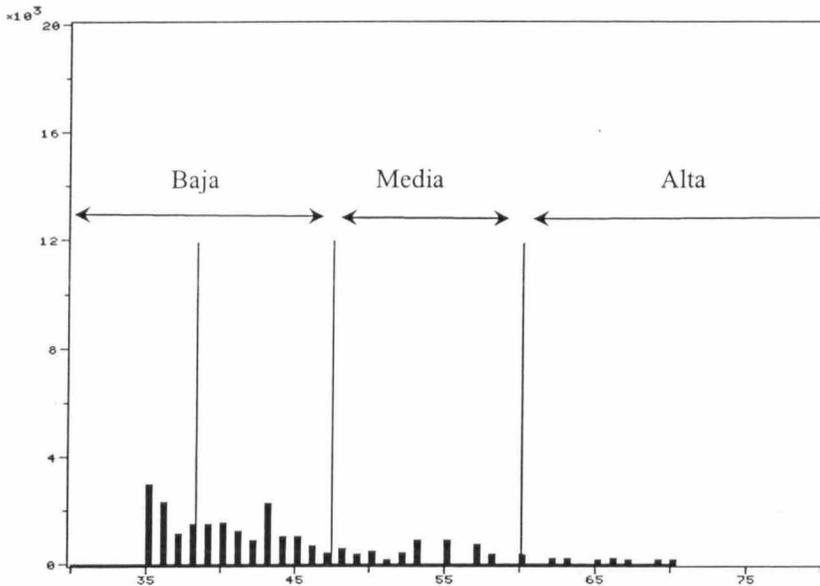
**Tabla 3.1:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Centro.

<i>Material SIL (Lado 1)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 40 dB)	(40 – 47 dB)	( 47 – 60 dB)	( 60 – 80 dB)
Baja (< 35 $\mu$ s)	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (35 – 120 $\mu$ s)				
Alta (>120 $\mu$ s)				

**Tabla 3.2:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Lado 1.

Material SIL (Lado 2)				
Duración \ Amplitud	Baja		Media	Alta
	(35 – 40 dB)	(40 – 47 dB)	(47 – 63 dB)	(63 – 80 dB)
Baja (<40 μs)	Creación y propagación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 120 μs)				
Alta (>120 μs)				

**Tabla 3.3:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material SIL corte Lado 2.



**Figura 3.5:** Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

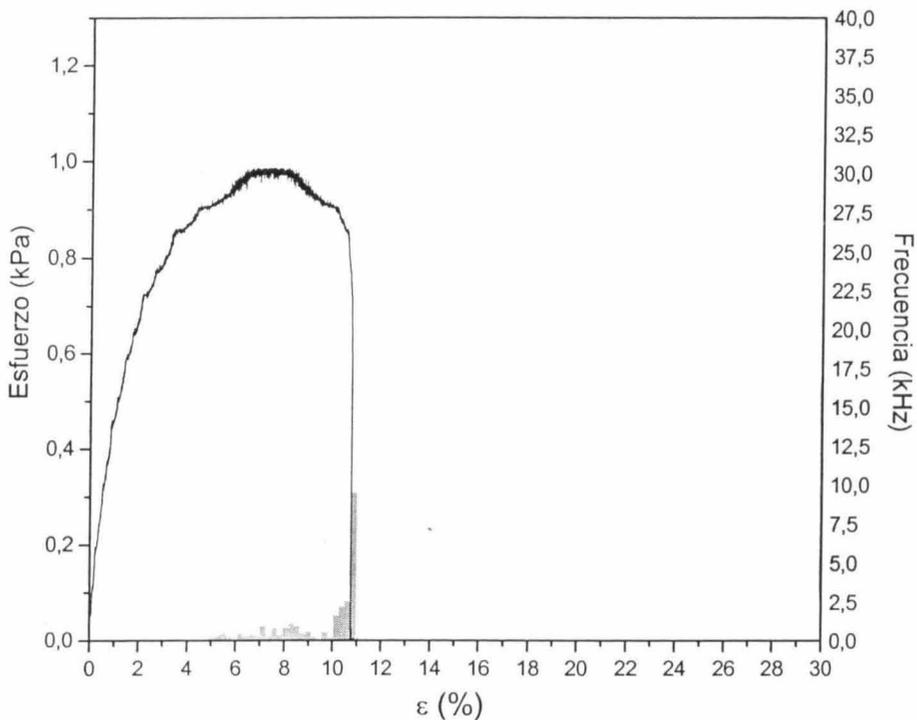
Para el material SIL se obtuvieron las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 que corresponden a los dominios de las 3 diferentes regiones de la cinta de material, en la primer región (*Centro*) el intervalo de la creación de grietas fue menor que en los otros casos, en la tercer región (*Lado 2*) se observa que el intervalo de propagación de grietas fue mayor en la duración de eventos acústicos y, para el dominio de la interfase se observó que su amplitud fue mayor que en los otros dos casos. Las zonas resultan distintas debido a que su composición no es homogénea y, el

carbonato como la fibra se distribuye heterogéneamente a lo ancho del material.

Del análisis de los gráficos de *duración de eventos acústicos vs. amplitud*, es posible pasar a analizar los gráficos de *frecuencia vs. amplitud*, ya que éstos muestran los mismos dominios en amplitud de cada elemento al fallar. De estos gráficos se puede pasar los de *frecuencia vs. tiempo*. En este último gráfico es posible convertir la escala de tiempos a escala de deformación ya que la rapidez durante la tracción fue constante.

En la *Figura 3.5* se señalan los cuadrantes observados en los gráficos correspondientes de *duración vs. amplitud* (*Figura 3.4b*), en donde se observan los dominios de creación de grietas, propagación de grietas, rompimiento interfacial y ruptura de material.

Con estos dominios definidos es posible analizar los gráficos mecánicos como se muestra a continuación.

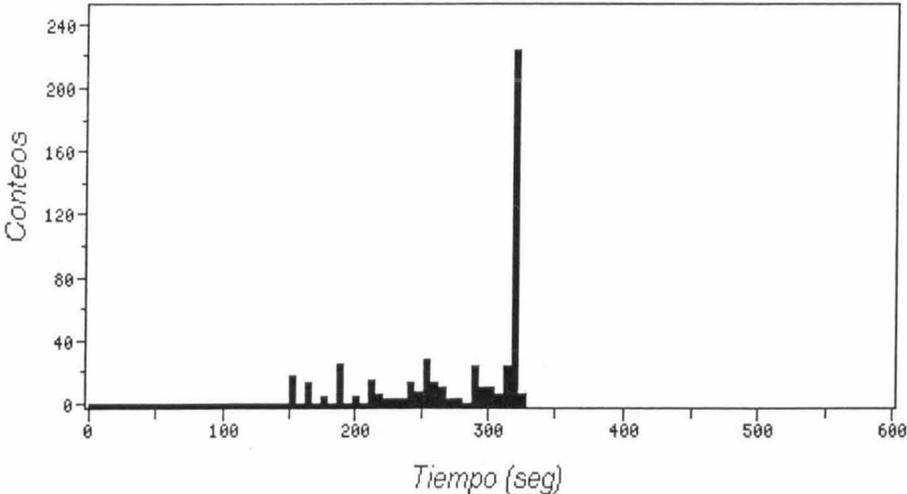


**Figura 3.6:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-deformación correlacionadas para observar los elementos de falla (material SIL).

La *Figura 3.6* muestra la superposición de los gráficos de *esfuerzo-deformación* y *frecuencia-deformación*, para la muestra SIL. De este gráfico se

observan dos zonas de fallas del material, la zona elástica y la zona de deformación plástica, esta segunda zona es en donde ocurren todos los eventos registrados en *EA* y se subdivide en dos zonas, la zona de falla de la interfase y la zona de rompimiento. La primer zona corresponde a la falla de la interfase y creación y propagación de las grietas, comprendida entre una deformación de 5% a 9.5% y, la segunda zona corresponderá a la falla generalizada de la matriz, con una deformación de 9.5% a 11%. La señal de la interfase se observa en toda la primera zona, mientras que la señal correspondiente a la matriz se observa un poco después de la mitad de ésta primera zona. Debido a que la señal de la interfase es de baja frecuencia, la señal de la matriz la cubrirá por efecto de pantalla. En esta zona (7% a 9% de deformación), las señales mas altas en frecuencia son atribuidas a la creación de grietas en la matriz y las de mediana frecuencia a la propagación de las mismas. En la segunda zona (9.5% a 11% de deformación) la señal obtenida corresponde a las frecuencias mas altas registradas, las cuales son atribuidas a la ruptura violenta del material.

La *Figura 3.7* muestra el conteo de eventos en función del tiempo. Se observa



*Figura 3.7:* Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

que el conteo de eventos se inicia principalmente a los 150 segundos. Comparando este gráfico con el de pruebas mecánicas (*Figura 3.6*) se ve que a ese tiempo el material se encuentra iniciando la zona de deformación plástica (cedencia). Se aprecia como los conteos van en aumento hasta alcanzar un valor máximo en esta zona y, posteriormente sus valores se vuelven a reducir,

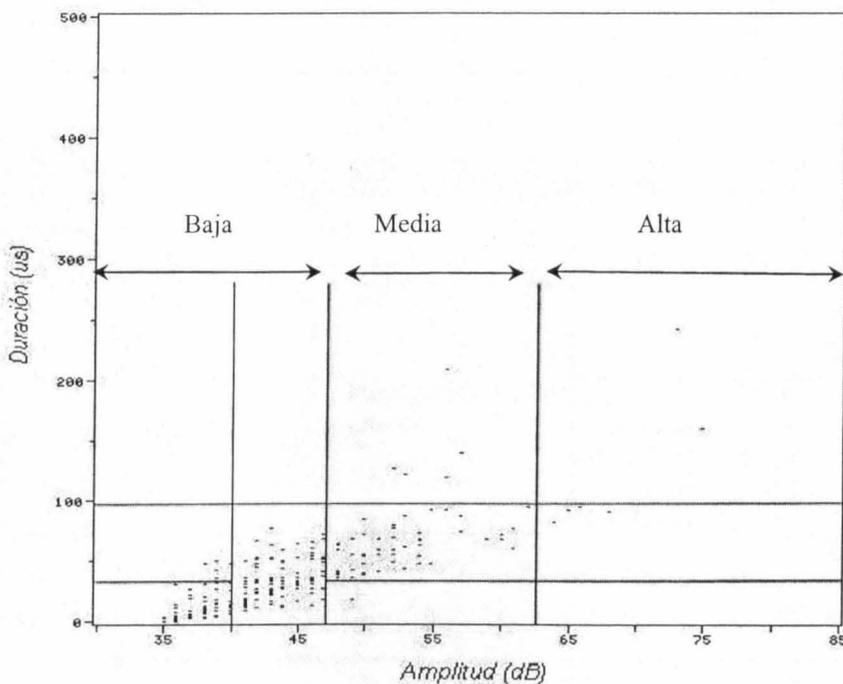
indicando que prácticamente todos los eventos debidos a la interfase han terminado, quedando únicamente la matriz como fuente de *EA*.

El conteo máximo registrado en la segunda zona, muestra la ruptura del material, el cual corresponde a la matriz. Este parámetro, al igual que la amplitud, esta relacionado directamente con la magnitud de la fuente, la cual depende de la distancia de ésta a los transductores. Con esto es posible determinar la posición de la falla dentro del material.

### 3.5. ANÁLISIS DEL MATERIAL NAOH.

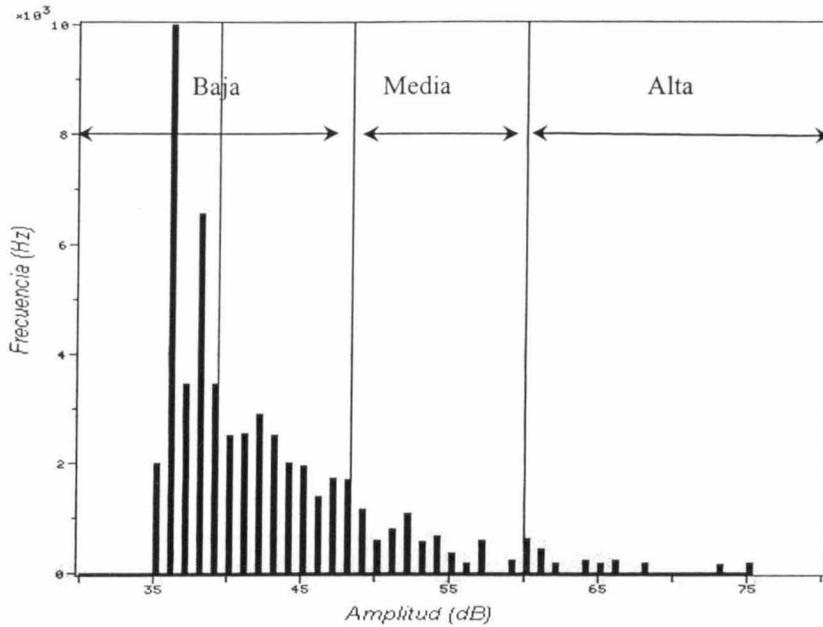
Como en el caso anterior se procede de igual manera para este material, se analizan los gráficos de *duración de eventos acústicos vs. amplitud*, se definen los dominios de cada elemento y se correlacionan con los gráficos de *frecuencia vs. Amplitud*. Posteriormente se pasa a los gráficos de *frecuencia vs. Tiempo* correlacionados a los gráficos de pruebas mecánicas, y con esto detectar los cuatro dominios.

La *Figura 3.8* muestra los dominios para este material en su corte central.



**Figura 3.8:** Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

La *Figura 3.9* es el gráfico equivalente al anterior pero con la *frecuencia* como función de la *amplitud*.



**Figura 3.9:** Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

<i>Material NaOH (Centro)</i>				
Duración \ Amplitud	Baja		Media	Alta
	(35 – 38 dB)	(38 – 47 dB)	(47 – 60 dB)	(60 – 80 dB)
Baja ( $< 40 \mu s$ )	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del $CaCO_3$ -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media ( $40 - 100 \mu s$ )				
Alta ( $>100 \mu s$ )				

**Tabla 3.4:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Centro.

<i>Material NaOH (Lado 1)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 38 dB)	(38 – 47 dB)	( 47 – 60 dB)	( 60 – 80 dB)
Baja (< 40 $\mu$ s)	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 100 $\mu$ s)				
Alta (>100 $\mu$ s)				

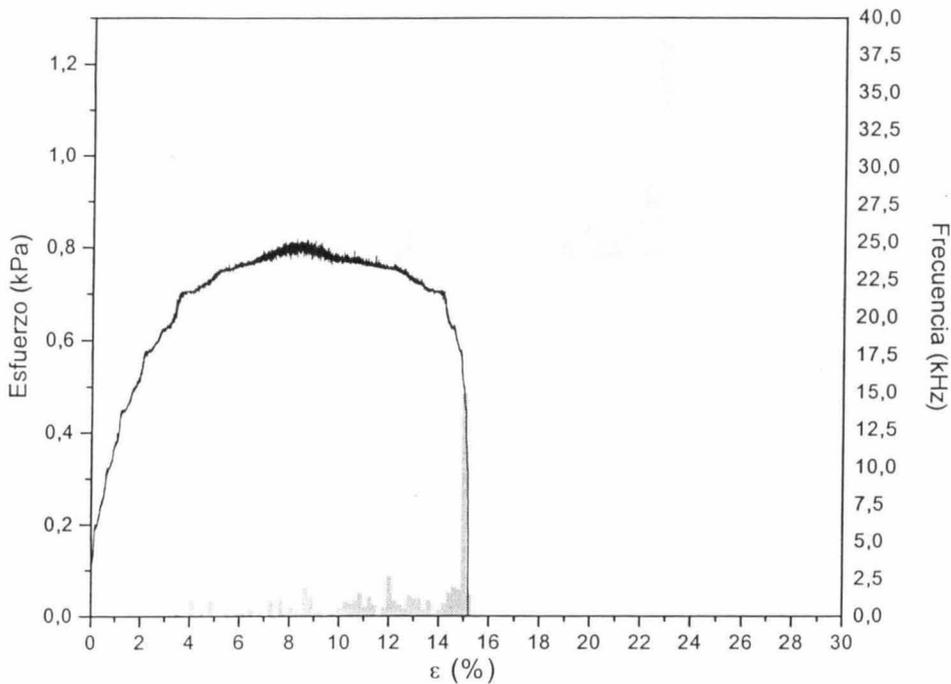
**Tabla 3.5:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Lado 1.

<i>Material NaOH (Lado 2)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 38 dB)	(38 – 47 dB)	( 47 – 56 dB)	( 56 – 80 dB)
Baja (< 40 $\mu$ s)	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 100 $\mu$ s)				
Alta (>100 $\mu$ s)				

**Tabla 3.6:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material NaOH corte Lado 2.

Del análisis de los gráficos se obtuvieron las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 en donde se observan los dominios para el material NaOH y sus 3 regiones. El primer dominio, en donde se generan las grietas, muestra que en las 3 regiones fue menor en este material (35-38 dB) que en el caso del material SIL (35-40 dB). En la tercera región (*Lado 2*) se aprecia que el dominio atribuido a la interfase también fue menor en este caso, pues este dominio fue el mínimo registrado (47-56 dB) y su duración de eventos acústicos no pasó de 100  $\mu$ s.

El comportamiento mecánico del material *NaOH* se observa en el gráfico de *esfuerzo-deformación* (Figura 3.10), éste muestra valores diferentes a los observados en el material *SIL*. Se registraron un mayor número de señales en la zona de deformación plástica en su primera división, que pueden ser



**Figura 3.10:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-tiempo correlacionadas para observar los elementos de falla (material *NaOH*).

atribuidas a la creación de grietas y su propagación en la matriz, lo que es un indicador de que la interacción interfacial es menor ya que la matriz falla rápidamente. En la segunda zona, se observa la ruptura de la matriz como una señal de alta frecuencia.

En la *Figura 3.11* se muestra el gráfico de *conteo de eventos vs. tiempo*, la primera señal de rompimiento de la interfase que se ve en esta figura está alrededor de 100 s (3.4% de deformación) está ubicada en la cedencia como ya se había visto anteriormente, en un tiempo de 260 s (8.6% de deformación) se observan las señales de agrietamiento en la matriz y en un tiempo 360 s (12% de deformación) los conteos debidos a la interfase terminan, como se ve en la *Figura 3.10*. Posteriormente, la matriz falla, generando una señal grande de conteo de eventos. En este material se tuvo un conteo menor al registrado en el material *SIL*.

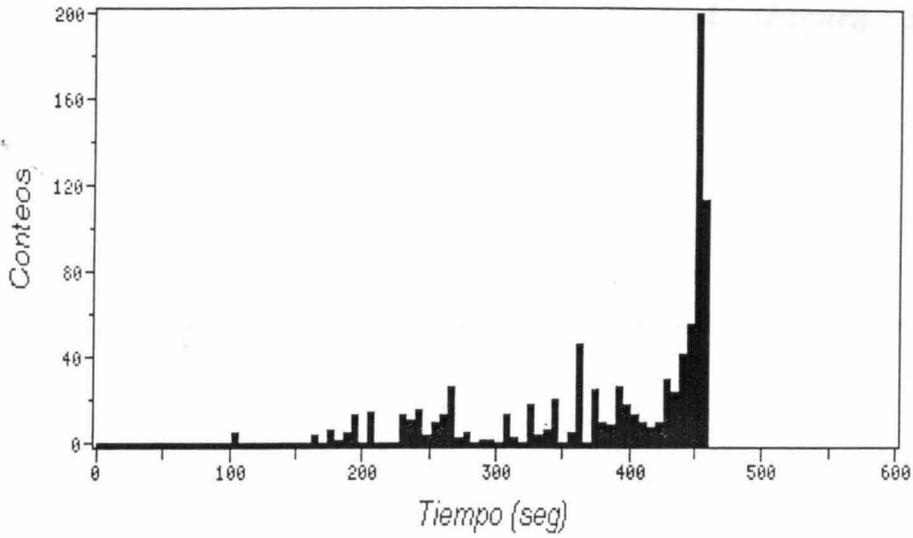


Figura 3.11: Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

### 3.6. ANÁLISIS DEL MATERIAL ST.

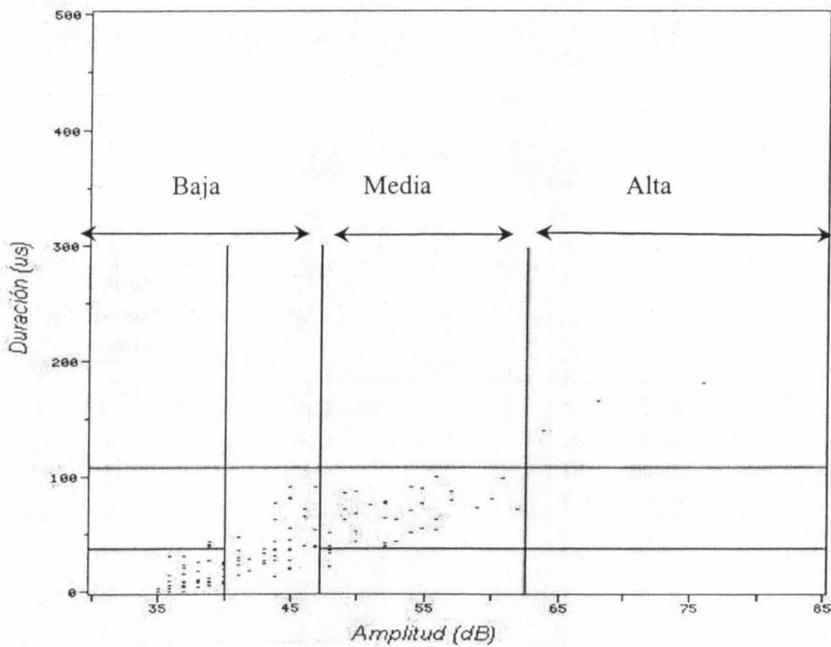


Figura 3.12: Gráfico de EA de Duración de eventos vs Amplitud con sus dominios delimitados.

Para este material se tienen los siguientes gráficos correspondientes a la duración de eventos acústicos vs. amplitud (Figura 3.12) y su

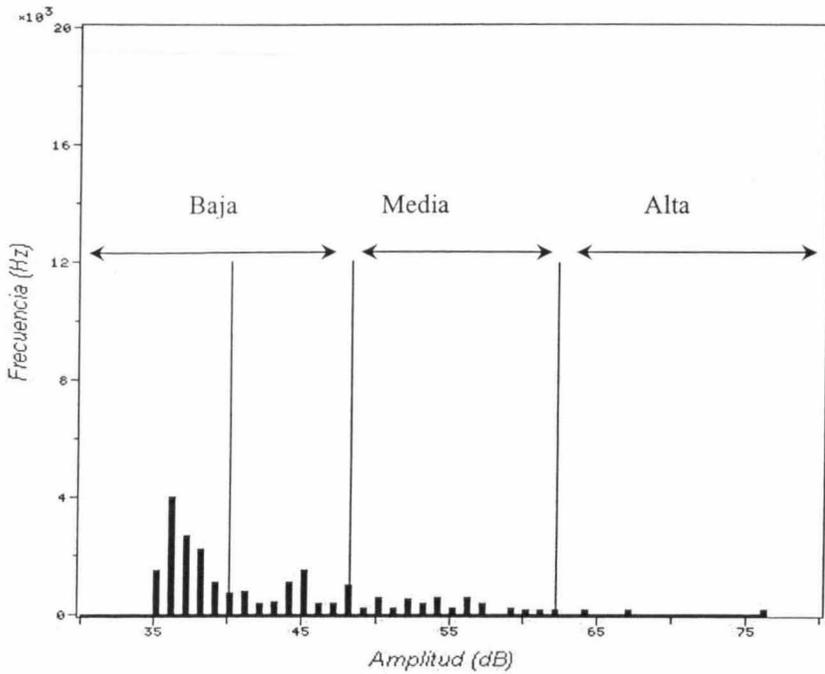


Figura 3.13: Gráfica de Frecuencia vs Amplitud con los dominios de falla.

correspondiente en frecuencia vs amplitud (Figura 3.13).

Material ST (Centro)				
Duración \ Amplitud	Baja		Media	Alta
	(35 – 40 dB)	(40 – 47 dB)	(47 – 63 dB)	(63 – 80 dB)
Baja (< 40 μs)	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del CaCO <sub>3</sub> -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 100 μs)				
Alta (>100 μs)				

Tabla 3.7: Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Centro.

<i>Material ST (Lado 1)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 41 dB)	(41 – 47 dB)	(47 – 60 dB)	(60 – 80 dB)
Baja ( $< 40 \mu\text{s}$ )	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del $\text{CaCO}_3$ -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 100 $\mu\text{s}$ )				
Alta ( $> 100 \mu\text{s}$ )				

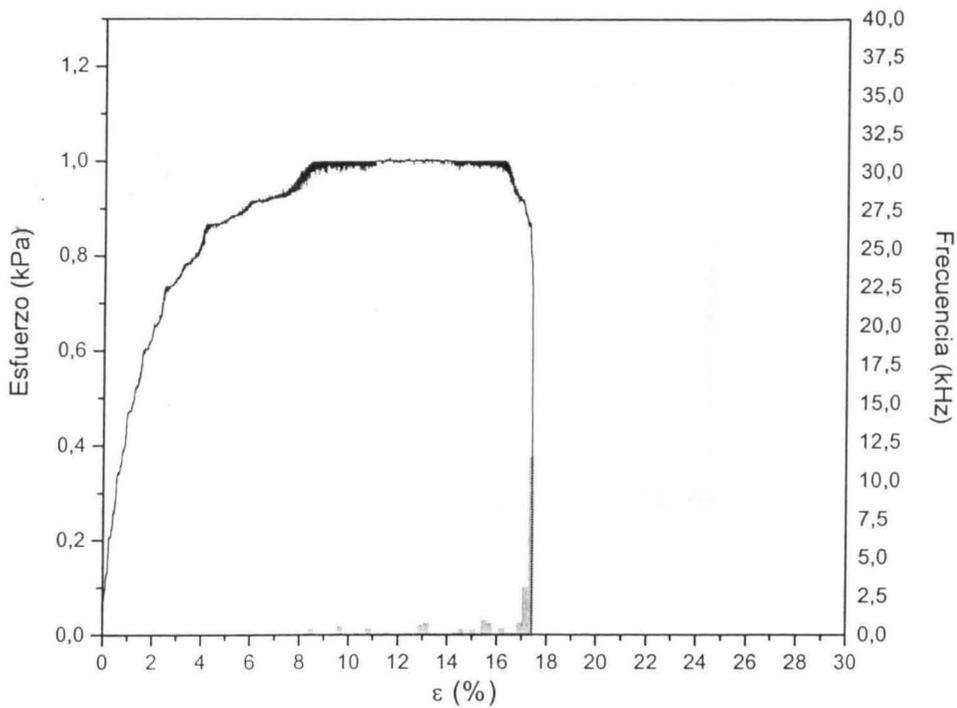
**Tabla 3.8:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Lado 1.

<i>Material ST (Lado 2)</i>				
Amplitud Duración	Baja		Media	Alta
	(35 – 42 dB)	(42 – 47 dB)	(47 – 57 dB)	(57 – 80 dB)
Baja ( $< 40 \mu\text{s}$ )	Creación de microgrietas en la matriz.	Propagación de las grietas.	Ruptura de las interacciones interfaciales de la fibra-matriz y del $\text{CaCO}_3$ -matriz.	Ruptura generalizada del material debida a la tensión.
Media (40 – 100 $\mu\text{s}$ )				
Alta ( $> 100 \mu\text{s}$ )				

**Tabla 3.9:** Correlación de los intervalos de los parámetros de EA con el mecanismo de falla para el material ST corte Lado 2.

En el material *ST* se observó que en sus dominios de creación de grietas y en el de propagación de grietas tuvo uniformidad sin variaciones. En el tercer dominio, se observa un cambio en las tres regiones de la cinta (*Centro, Lado 1* y *Lado 2*), en el *Centro* se ve el intervalo más grande, continuándole el *Lado 1* y el más pequeño fue el *Lado 2*.

La *Figura 3.14* muestra el gráfico de *esfuerzo-deformación* para el material *ST*. Se registra una menor cantidad de señal para las diferentes frecuencias y,



**Figura 3.14:** Gráficas de esfuerzo-deformación y frecuencia-deformación correlacionadas para observar los elementos de falla (material ST).

una meseta de carga máxima comparable a la del material *SIL*. La deformación para este material resultó ser la mayor respecto a los tres materiales. Esto puede ser atribuido a una menor adhesión interfacial. Las señales de la interfase aparecen a lo largo de la meseta de la zona plástica del material. La señal de la matriz, que corresponde a la creación y propagación de grietas aparece en la zona de destrucción del material.

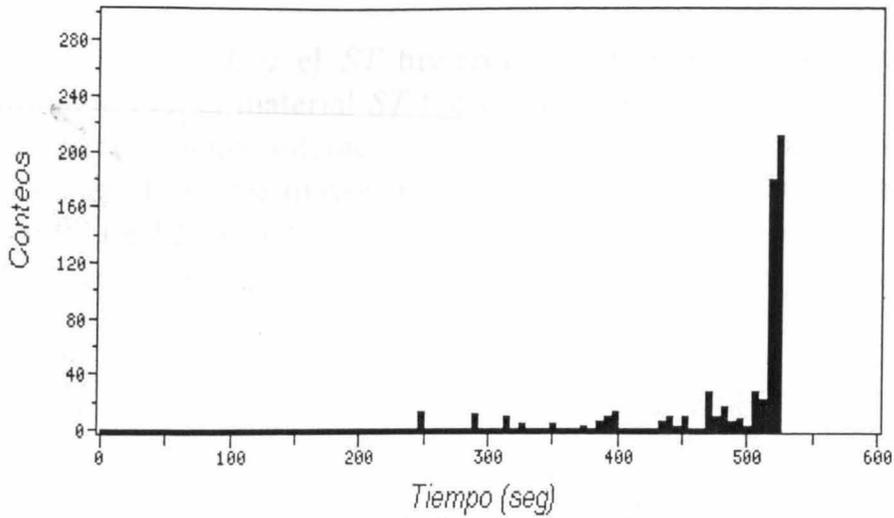
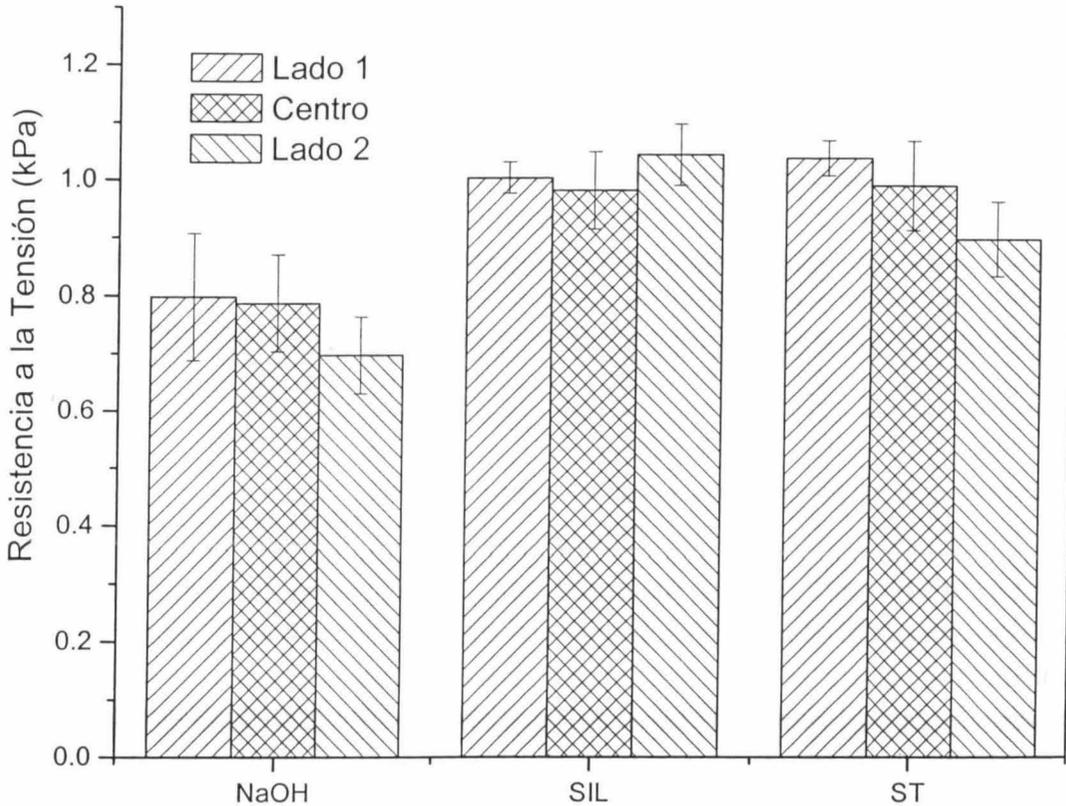


Figura 3.15: Gráfica de Conteo de eventos vs Tiempo.

La Figura 3.15, muestra el conteo de eventos contra el tiempo, se observa un conteo de eventos bajo en la zona de deformación plástica, esto se debe a que la interacción es pobre (y en algunos casos nula) y no puede liberar tanta energía como para generar grandes señales. Cuando rompe la matriz, se obtiene una señal grande atribuida a la falla generalizada del material.

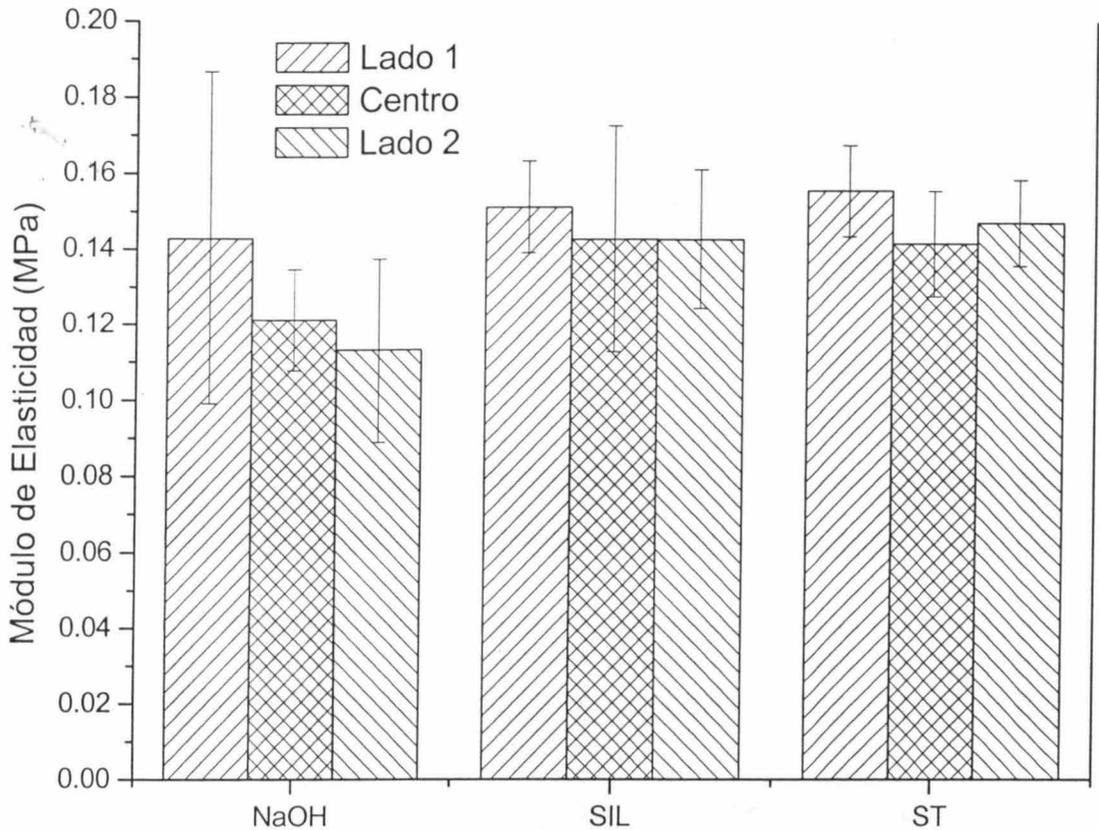
### 3.7. DISCUSIÓN.

Los materiales *SIL* y el *ST* tuvieron cargas máximas equivalentes, pero la deformación en el material *ST* fue considerablemente mayor, debido a que es la matriz con menor interacción interfacial. La duración de eventos acústicos en el material *SIL* fue mayor que el de los otros dos materiales, alcanzando un promedio de  $120 \mu\text{s}$  en el dominio de la interfase, mientras que para los otros dos materiales se mantuvieron en un dominio no mayor a  $100 \mu\text{s}$ .



**Figura 3.16:** Gráfico en donde se comparan los esfuerzos promedio de los tres materiales y sus tres regiones con su error.

El material *SIL* fue el que presentó valores de carga máxima más uniformes a lo ancho de la cinta (*Lado 1*, *Centro* y *Lado 2*) ya que los errores experimentales están dentro de su margen, como se muestra en la *Figura 3.16*, así mismo los materiales *NaOH* y *ST* se observó un decremento del *Lado 1* hacia el *Lado 2*, pero en las desviaciones estándar en el material *NaOH* se mantuvo dentro de valores aceptables para considerarse uniforme; mientras que el material *ST* presentó una caída notable en el valor de carga del *Lado 2*, sus desviaciones en el *Lado 1* y el *Lado 2* difieren, consecuentemente la carga máxima en estos dos lados se consideran distintas.

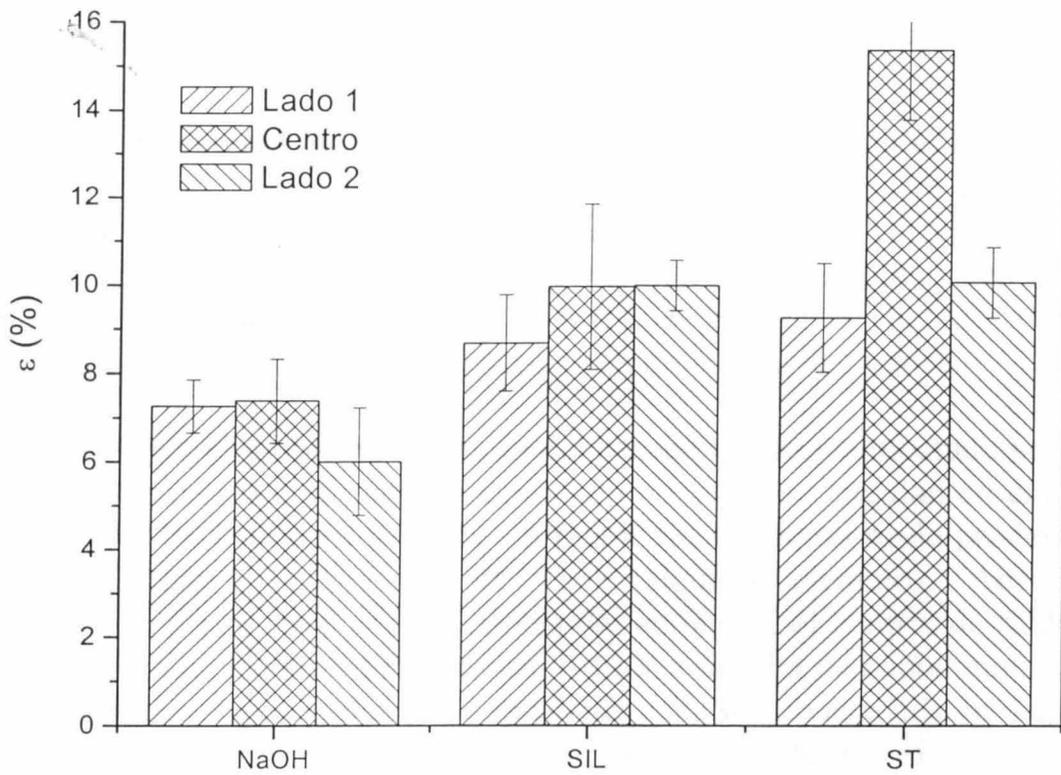


**Figura 3.17:** Gráfico que compara el módulo elástico de los tres materiales y sus tres regiones con su error.

Al compararse los módulos de elasticidad de los tres tipos de materiales y sus tres regiones como se muestra en la *Figura 3.17*, se observa que prácticamente no existen diferencias debido a que todos los valores están contenidos dentro del error permisible. El hecho de que los módulos sean iguales es un indicador de que el tratamiento interfacial no es un parámetro que afecte a la zona elástica. El módulo elástico es debido a la fibra principalmente.

El material *NaOH* fue el que sufrió menos deformación, sus valores de deformación para las tres regiones fueron muy similares, solamente el *Lado 2* tiene un valor levemente por debajo de los otros pero su desviación estándar lo mantiene dentro del intervalo de error y se considera comparable. El material *SIL* tuvo una mayor deformación respecto al *NaOH* pero sus valores de deformación fueron más variables en sus tres regiones, al igual que el material *NaOH*, se ve una caída en su deformación y la desviación estándar mantiene a estos valores como comparables. El material *ST* fue el que alcanzó la deformación máxima de los tres materiales, mientras que sus lados se mantienen comparables, la región *Centro* tuvo un valor de deformación muy

superior al compararse con sus lados y con los otros dos materiales como se muestra en la *Figura 3.18*.



**Figura 3.18:** Gráfico que compara la deformación de los tres materiales y sus tres regiones con su error.

En resumen, mecánicamente el material *SIL* presentó las mejores propiedades al ser el más uniforme tanto en carga como en deformación; el material *ST* en su *Lado 1* fue comparable en carga máxima al material *SIL* aunque tuvo diferencias notorias en su carga y deformación. El material *NaOH* fue el que alcanzó la menor carga máxima y deformación respecto a los otros materiales. En lo que se refiere a la interfase, el material con fibra *NaOH* resultó tener la interacción mas pobre, al presentar los valores de carga menores, sin embargo, esto debería provocar una mayor deformación, la cual no se presentó. Lo anterior podría ser atribuido al relleno de carbonato que hizo rígida a la matriz y, la fibra tratada con *NaOH*, ya que ésta resultó ser más incompatible que los otros dos tratamientos, provocó que también actuara como relleno creando muchos más puntos de concentración de esfuerzos que en los otros materiales, propagando las grietas más rápido hasta la ruptura del material.

## *CAPÍTULO IV.*

### *CAPACIDAD DE AISLAMIENTO ACÚSTICO.*

#### *4.1. ANTECEDENTES.*

El ruido representa un importante problema ambiental para el hombre, desde tiempos pasados hasta la actualidad, en el Imperio Romano ya existían reglas relativas al ruido emitido por las ruedas de hierro de los carros, que al rozar con las piedras del pavimento, podían molestar a los ciudadanos; en la Europa Medieval se prohibió el uso de los carruajes en ciertas ciudades durante la noche, con el fin de asegurar un sueño tranquilo a sus habitantes.

Sin embargo, el problema del ruido del pasado es nada comparado con lo que es en la actualidad; la inmensa cantidad de autos que circulan en ciudades y carreteras, los camiones pesados sin motor silenciado, el ruido producido por aviones, trenes, industrias, etc., son algunos ejemplos. Además, en comparación con otros contaminantes del ambiente, el control de ruido no es del todo suficiente en muchos casos, debido a la falta de conocimiento de los efectos nocivos que conlleva la exposición a él. Siendo éste hoy en día, uno de los más agresivos contaminantes, no solo atmosférico sino también de trastornos físicos al ser humano, pérdidas de audición y desequilibrios psicológicos cuando es sometido a ciertos niveles de ruido.

La producción de ruido es inherente a toda actividad humana, dando una idea del desorden de la misma, por lo que el planteamiento de un ambiente sin ruido es esencialmente contrario a la actividad social. Es por esto, que se ha de buscar un punto de equilibrio entre los niveles de ruido que producen daños y, la cantidad de ruido necesaria para que se pueda desarrollar la actividad social. Este punto de equilibrio será diferente para cada grupo social pues dependerá de las costumbres de cada uno, por ejemplo entre una ciudad y un pueblo. Es por tanto necesario que exista una regulación que establezca límites máximos de ruido, además debe haber medidas correctoras y que disponga de los sistemas de vigilancia para realizar un control efectivo de estos límites.

El ruido es un concepto inherente a todo proceso de transporte de información. El elemento portador de la información recibe, a veces, agresiones que deterioran o causan la pérdida de ella. Cuando esto ocurre se dice que el elemento portador ha pasado por un proceso ruidoso. En acústica, este proceso puede contemplarse de dos formas principales: Una es que la onda sonora es

interferida o "tapada" por otros sonidos no deseados, ocasionando interferencia en la comunicación oral o, cualquier otro sonido que realmente queremos escuchar. La otra forma es cuando se reciben sonidos que no son agradables al oído humano y producen molestias. Por tanto, el ruido en acústica es todo aquel sonido no deseado.

El ruido tiene dos componentes:

- Una componente objetiva, que es el sonido en sí y por tanto, medible y cuantificable.
- Una componente subjetiva, "la sensación que nos produce", que no se puede medir pues depende de: quién, dónde, cuándo y cuánto se perciba el sonido.

El control de la acústica es esencial en todo lo que es sonido, ruidos y bienestar en el hogar y la empresa. Es claro que un ambiente ruidoso (con poco aislamiento) el cual es invadido por ruido del exterior es molesto. Pero comúnmente no se percibe cuan perturbador y tensionante es un ambiente con mala acústica (sin absorbentes) donde la reverberancia y los ecos o reflexiones confunden y quitan entendimiento, siendo difícil comprender lo que se habla o escucha, así como también hay que hablar más fuerte para comprender algo. Esos ambientes no son *cálidos* ni agradables para estar, si no hay materiales absorbentes todos los ruidos se transmiten de un lado al otro. Por eso se tiene que diferenciar claramente entre absorción de sonido y aislamiento de ruidos.

La *absorción* es para mejorar la acústica de una sala y el sonido interior de la misma. Son los *tratamientos acústicos* que disminuyen la reverberancias, resonancias y nivel de sonido indeseables (ecos y reflexiones). Cualquier material poroso es absorbente del sonido (telas, esponja, lana de vidrio, placas de yeso con agujeros, etc.), pero otros materiales aislantes térmicos no lo son (telgopor, corcho, madera) estos últimos no mejoran en nada la acústica, ni siquiera son buenos aislantes de los ruidos. Los materiales aislantes del sonido son diferentes y mucho más complejos, ya que deben evitar el paso del sonido de un ambiente a otro (o desde el exterior). Por lo tanto deben ser pesados y blandos al mismo tiempo, el plomo es el mejor de todos ya que aísla del sonido y de las vibraciones, pero es completamente antieconómico. En forma práctica se usan paredes con cámaras de aire aisladas.

Una forma de mejorar las propiedades acústicas en un recinto es reducir la *reflexión*. Alfombras, cortinas gruesas o materiales especiales pueden usarse como medios absorbentes. La capacidad de un material para absorber el sonido se denomina *coeficiente de absorción* y varía notablemente con la frecuencia. Representa la fracción de energía absorbida comparada con la energía total incidente, por ejemplo, material con coeficiente 0.35 absorbe 35 % de la energía.

#### 4.2. ATENUACIÓN EN UN MEDIO NO HOMOGÉNEO.

Atenuación es la pérdida de energía acústica de un haz sonoro. Las fuentes de disipación de esta energía acústica se pueden dividir en dos categorías: las debidas a pérdidas *en el medio* y las asociadas con pérdidas *en las fronteras* del medio. La primera es importante cuando el volumen del fluido es grande, como en la transmisión del sonido a través de la atmósfera y los océanos o, a través de ductos grandes y dentro de grandes auditorios. La segunda es importante en el extremo opuesto: con materiales porosos, ductos delgados y recintos pequeños. Las pérdidas en el medio pueden dividirse en tres tipos: pérdidas viscosas, pérdidas por conducción de calor y pérdidas asociadas con intercambios moleculares de energía.

Las pérdidas viscosas resultan siempre que hay movimientos relativos entre porciones adyacentes del medio, tales como los que acompañan a las compresiones y rarefacciones en la transmisión de una onda acústica, se pueden considerar como pérdidas por fricción. Las pérdidas por transmisión de calor resultan en la conducción de energía térmica entre las condensaciones de mayor temperatura y las rarefacciones de menor temperatura. La pérdida por intercambios moleculares de energía causa que la energía cinética de las moléculas se convierta a otro tipo de energía de nivel molecular (como energía potencial, energía interna rotacional y vibracional, y energías de asociación y disociación).

Cuando un medio de propagación presenta inhomogeneidades tales como partículas suspendidas, microceldas, cambios de fase, la energía acústica se pierde más rápidamente que en un medio homogéneo. Por ejemplo, la presencia de gotas de agua disminuye la velocidad del sonido en el aire hasta valores de  $0.9c$ , siendo  $c$  la velocidad del sonido en el aire seco y a la misma temperatura.

### 4.3. LEY DE MASA.

La ley de masa es una expresión semiempírica que puede utilizarse para predecir la pérdida por transmisión de particiones delgadas, homogéneas y simples. La ley de masa se describe matemáticamente como:

$$TL = 20 \log_{10}(mf) - 48$$

donde  $TL$  es la pérdida por transmisión en dB,  $m$  es la masa de la superficie en  $\text{Kg/m}^2$  y  $f$  es la frecuencia en Hz.

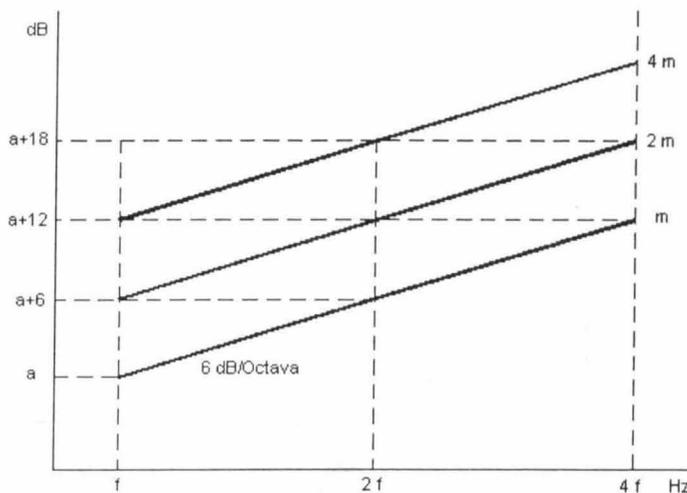


Figura 4.1: Representación gráfica de la Ley de Masa.

Al aumentar la masa, se espera un aumento en la pérdida de transmisión, ya que cuanto más pesada es la partición, menos vibra en respuesta a las ondas sonoras y, por tanto, menos energía sonora irradia hacia el otro lado. La ley de masa se aplica a placas delgadas de materiales de construcción, a frecuencias por debajo de la *frecuencia de coincidencia*.

La ley de masa predice que la pérdida por transmisión aumentará en 6 dB por cada duplicación de la masa de la superficie o la frecuencia (Figura 4.1). Puede lograrse un aumento de la masa aumentando el grosor del material o seleccionando materiales más densos [27-30].

#### 4.4. EFECTO DE COINCIDENCIA.

Al aumentar la frecuencia, aparece un nuevo mecanismo de transmisión del sonido que impone una limitación a la validez de la ley de masa: las vibraciones de flexión, que dan lugar al fenómeno de coincidencia. Mientras que a bajas frecuencias la placa se mueve como un todo, a altas frecuencias

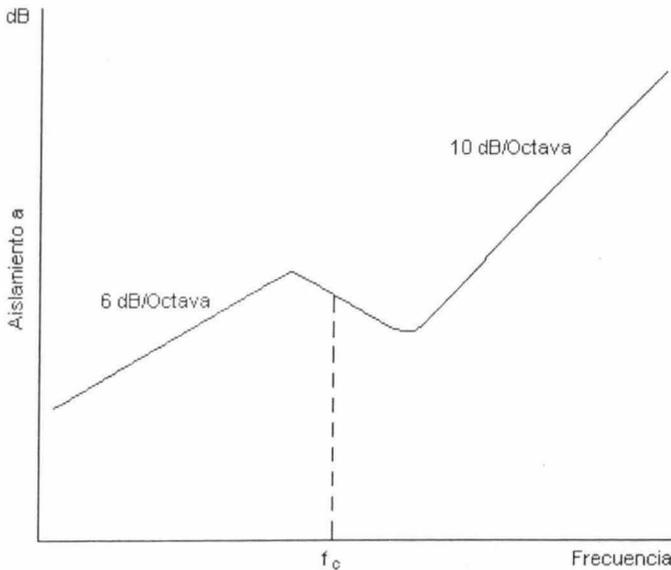


Figura 4.2a: Esquema simplificado del efecto de coincidencia.

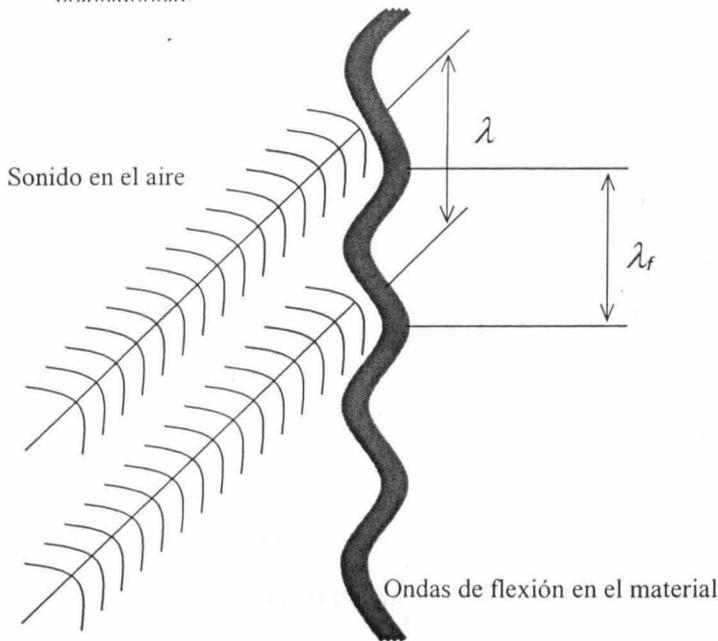


Figura 4.2b: Visualización del efecto de coincidencia.

pueden experimentar movimientos de flameo, como una tela tensa sacudida por uno de sus extremos o una bandera al viento. Cuando la onda sonora incide oblicuamente sobre el material, a partir de cierta frecuencia, denominada frecuencia crítica,  $f_c$ , se puede producir una coincidencia entre la proyección sobre la superficie de la onda sonora en el aire y, la onda de flexión (Figura 4.2a y 4.2 b). Esto lleva a la pared a entrar en resonancia, es decir, a vibrar con gran amplitud, por lo que se convierte en un radiador sonoro muy eficiente del otro lado del material. Como consecuencia, la atenuación acústica que proporciona el material, en lugar de seguir aumentando con la frecuencia, como predice la ley de masa, disminuye, imponiendo un límite efectivo para el aislamiento en altas frecuencias [27].

#### 4.5. REGIONES DE PROPAGACIÓN.

Los distintos mecanismos de propagación se vuelven importantes en los recintos, en función de la relación existente entre la longitud de onda y el tamaño del recinto y de los obstáculos que se encuentran en el camino de propagación.

Así, de la Figura 4.3 se pueden definir 3 regiones [26, 31]:

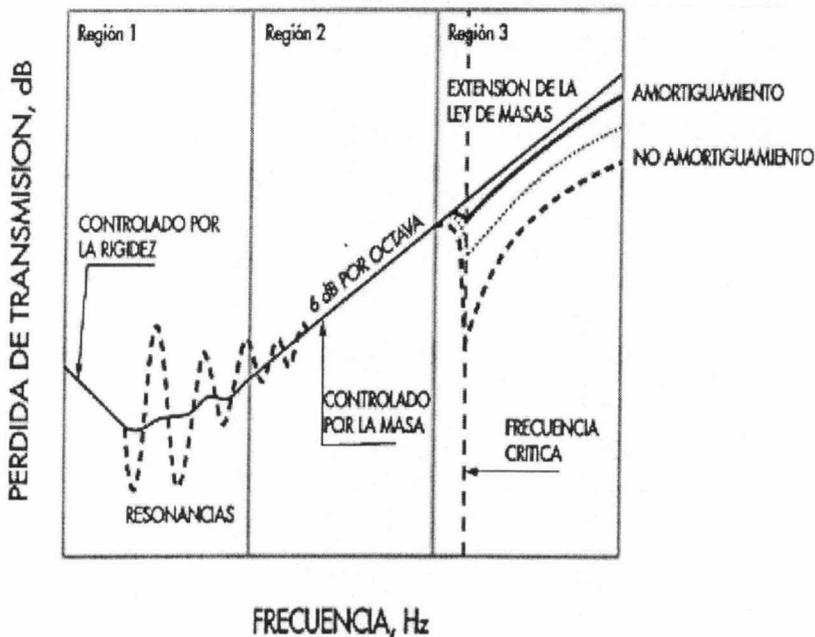


Figura 4.3: Gráfico de Pérdida de Transmisión sonora en función de la frecuencia y sus regiones de propagación

### *Región 1:*

A bajas frecuencias la atenuación acústica está controlada por la rigidez de la placa, que origina que ésta se comporte como una membrana, presentando una serie de frecuencias naturales de resonancia, para las cuales disminuye la atenuación permitiendo que un mayor flujo de energía acústica pase a través de ella. En esta región, las frecuencias resonantes son una función de las dimensiones de la placa y se encuentran en la transición entre la región 1 y 2.

### *Región 2:*

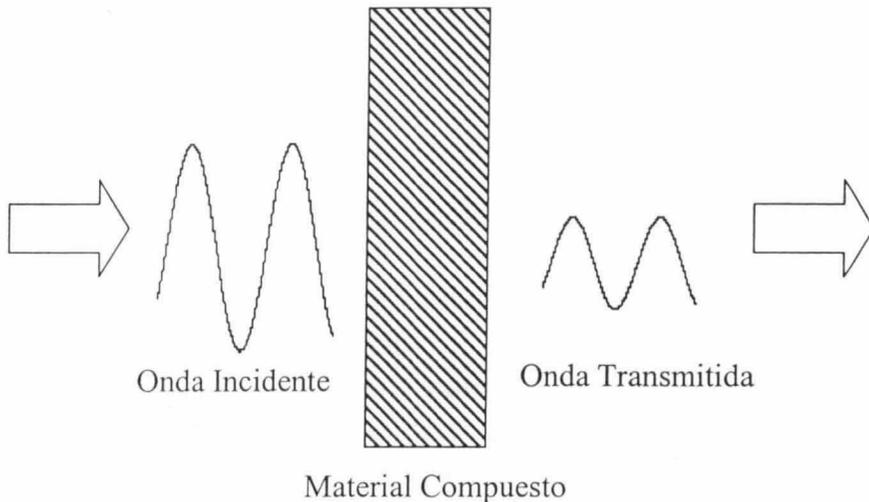
La atenuación acústica de la placa está controlada por su masa y es independiente de la rigidez. Al ir subiendo la frecuencia, la longitud de onda empieza a ser pequeña comparada con las dimensiones del material, pero el espesor de la pared todavía tiene dimensiones comparables. En esta región, algo de la energía acústica es transmitida a través de la placa (refracción) y el resto es reflejado.

### *Región 3:*

En esta región, las dimensiones de la placa son muy grandes comparadas con la longitud de onda. El aislamiento acústico está controlado por la rigidez y el amortiguamiento interno de la placa, presentando una disminución de la atenuación apreciable, debido al *Efecto de Coincidencia*. Este efecto tiene lugar cuando la longitud de onda del sonido incidente es igual a la longitud de onda de la onda de flexión a lo largo del panel. En esta región, la atenuación depende fuertemente de la frecuencia de incidencia de las ondas y del amortiguamiento interno del material.

#### 4.6. EXPERIMENTAL.

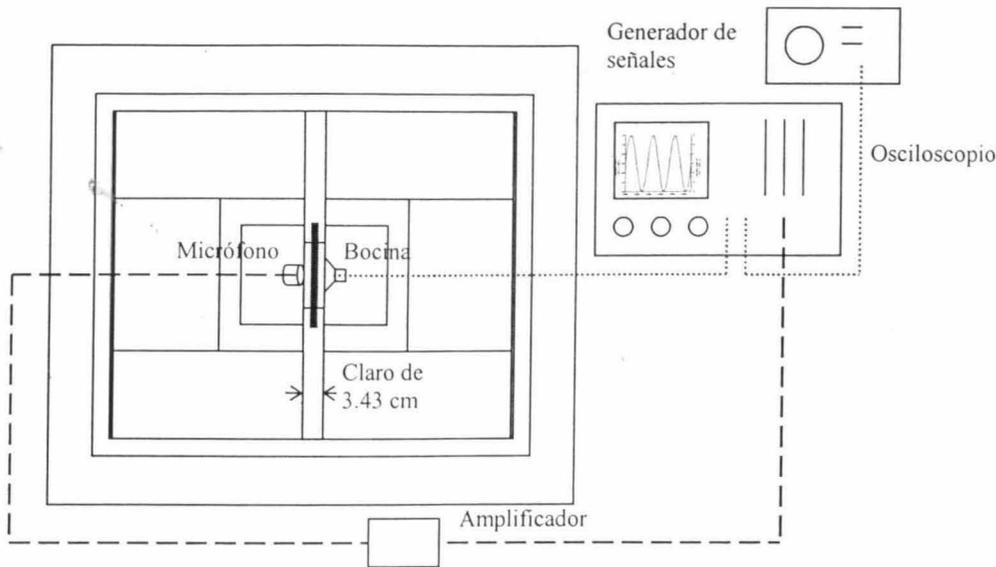
La experimentación se basa en hacer incidir una onda acústica a los materiales escogidos para este trabajo y, captar la onda saliente del otro lado del material, *Figura 4.4*. A las ondas tanto incidentes como transmitidas se les mide su amplitud y su diferencia de fase que ocurre por haber atravesado al material, teniéndose control de la frecuencia por medio de un generador de señales.



*Figura 4.4: Mecanismo de atenuación de las ondas a través de un material*

Como es sabido, las ondas acústicas generadas por una fuente normal son ondas esféricas. Para los experimentos se debe tener lo más aproximado a una onda plana. Para lograr esto, se construyó una caja anecóica, la cual eliminará cualquier reflexión de las ondas. Se colocó tanto la fuente de sonido como el detector lo suficientemente cerca de la muestra para que el frente de onda que ingresa al material se pueda considerar plano. Esta suposición dejará de ser válida para frecuencias altas, pues la curvatura del frente de onda aumenta conforme aumenta la frecuencia.

La estructura de la cámara anecóica se construyó con madera y, se rellenó con espuma de poliuretano y de poliestireno, formando una cavidad cuadrangular donde se alojó una bocina y un micrófono en cada extremo. En el centro va el material compuesto, *Figura 4.5*.



**Figura 4.5:** Diagrama del sistema de medición de aislamiento acústico

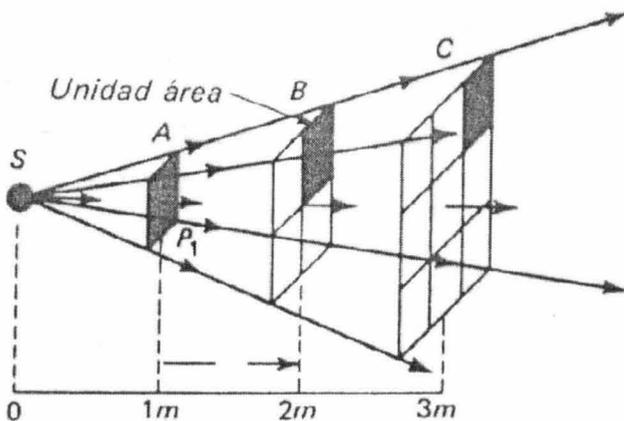
El claro entre la bocina y el micrófono es de 3.43 cm y un marco de 10×20 cm donde va insertada la placa de material. La bocina va conectada a un generador de señales en donde se tiene control de la amplitud (Voltios) y la frecuencia (Hz), el micrófono va conectado a un amplificador (amplificación ×20) y a un osciloscopio de dos canales, en donde se toman las lecturas de la onda incidente y de la transmitida por el material, a diferentes frecuencias y a una amplitud de salida constante (bocina) de 1.5 V. Se realizaron pruebas barriendo todo el espectro de frecuencias audible (de 300 a 15,000 Hz), posteriormente se hizo énfasis en el intervalo de frecuencias en donde se encontraron diferencias notorias que son atribuidas principalmente al tratamiento superficial de la fibra. De las cintas extruídas de los materiales compuestos, se cortaron 4 placas del *Lado 1*, 4 placas del *Centro* y 4 placas del *Lado 2*, como en los experimentos de *EA* anteriormente presentados. Las tres secciones de un mismo material, presentaron valores iguales tomando en cuenta el error experimental, tanto en atenuación como en diferencia de fase. Por lo tanto se tomó de forma representativa los espectros centrales para la discusión de este capítulo.

En los experimentos de atenuación se tienen varios mecanismos por los cuales ocurre ésta, o sea la disipación de la energía de la onda elástica, a continuación se describen estos mecanismos:

- **ATENUACIÓN POR FRICCIÓN:** Este mecanismo está basado en el tipo de tratamiento interfacial de cada material, se parte del conocimiento de que al tener una interacción interfacial débil, cuando se hace pasar la onda a través del material, la energía de la onda será disipada por medio

de la fricción generada entre las fibras y la matriz, ya que cada una vibrará de forma independiente y sin armonía, por tal motivo, pierde energía por disipación en forma de calor.

- **ATENUACIÓN POR CAMBIO DE FASE DE MATERIAL:** Cuando la onda elástica atraviesa un medio sólido, sus propiedades dependen de la densidad del material en que se propaga, de lo anterior se puede inferir que al haber una buena interfase el cambio de densidad será más gradual y la onda pasará sin muchos cambios, solo su velocidad de propagación se verá afectada, por el contrario, cuando la interacción es mínima, una fracción de la onda va a ser reflejada en todas direcciones al chocar con las fibras, pues representan una fase totalmente distinta y definida, esto va a ocasionar que disminuya su intensidad y cambie su ángulo de fase inicial.
- **ATENUACIÓN POR INTERFERENCIA:** Este mecanismo es debido al fenómeno de *interferencia destructiva*, ya que cuando las ondas, al cambiar sus fases dentro del material, coinciden una cresta con un valle, se destruyen entre sí.



**Figura 4.6:** Representación esquemática de la Ley Cuadrática Inversa.

De las lecturas de fondo (sin material) tomadas se observó una atenuación debida a la distancia, este fenómeno es explicado por la *Ley cuadrática inversa* [2], la cual nos dice que la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. Como ecuación se escribe:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  son las intensidades que corresponden a un mismo sonido a dos distancias diferentes  $d_1$  y  $d_2$ .

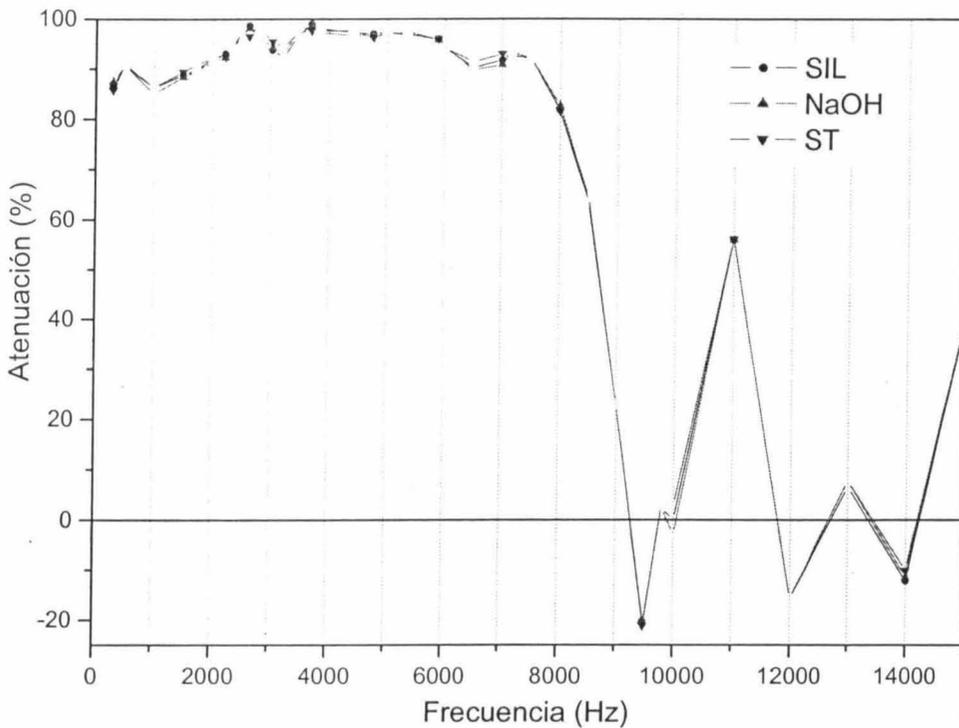
En la *Figura 4.6*, **S** representa una fuente de sonido, las ondas se propagan en línea recta a partir de ella. Sea cual fuere la energía que reciba la superficie **A**, a un metro de distancia o las superficies **B** y **C**, situadas respectivamente a 2 y 3 metros de la fuente, recibirán exactamente la misma cantidad de energía. Por

lo que la energía recibida por segundo a cada una de estas distancias por unidad de superficie será respectivamente  $P_1$ ,  $P_{1/4}$  y  $P_{1/9}$ .

#### 4.7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

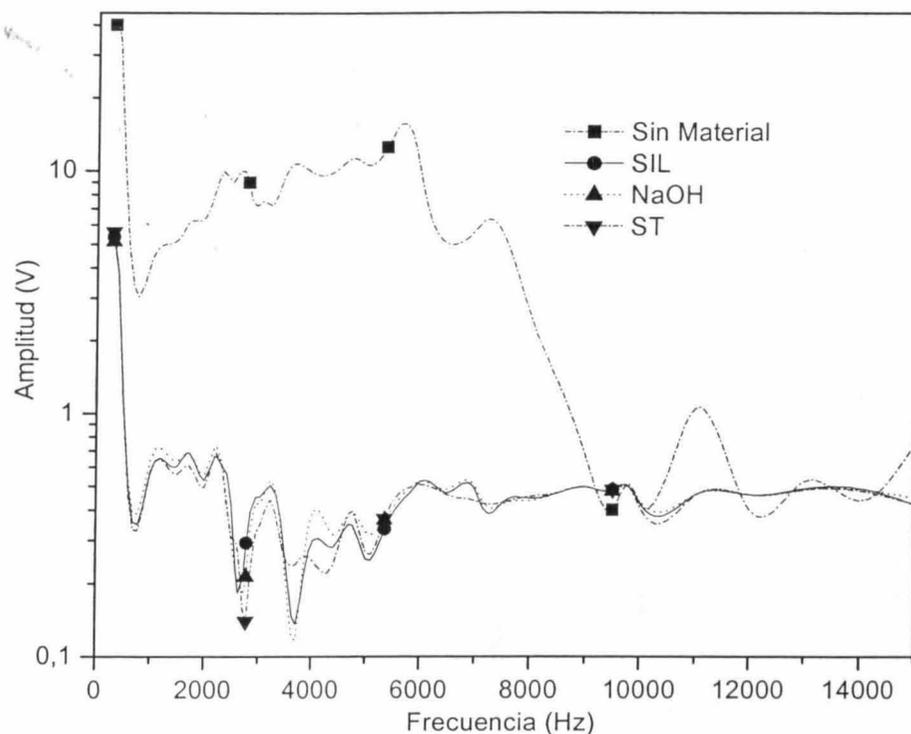
La *Figura 4.7* presenta el porcentaje de atenuación obtenido para los tres materiales.

Este porcentaje se obtuvo simplemente al dividir la amplitud de la onda que se recibe con material entre la amplitud de la onda que se recibe sin material, multiplicado por cien. Como puede observarse hay dos zonas bien definidas de atenuación; la primera en el intervalo de 2 a 6 KHz y la otra de 6 a 15 KHz. En la primera zona se alcanza, en algunas frecuencias, hasta un 99 % de



*Figura 4.7:* Gráfico de la atenuación presentada por los materiales.

atenuación, esta zona es donde se presentó la mayor atenuación. Mientras que en la segunda zona, la atenuación cae hasta el punto en donde la onda deja de ser atenuada y, en algunos intervalos de frecuencias, hasta es amplificada. En esta región el material pierde toda su eficiencia como aislante acústico. Pueden estar ocurriendo otros fenómenos por los cuales el material compuesto pierde sus propiedades acústicas, como puede ser el efecto de coincidencia o que la caja anecoica a altas frecuencias deje de ser efectiva y ocurran ecos en su interior.

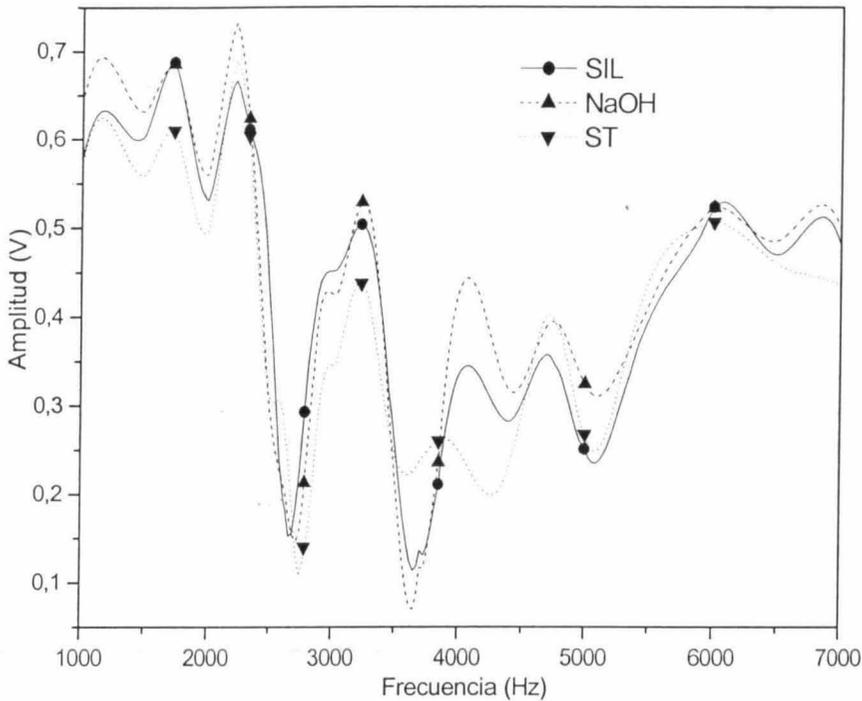


**Figura 4.8:** Espectro de las amplitudes registradas de los tres materiales comparados con la señal sin atenuación

En la *Figura 4.8* se muestra el espectro obtenido para los tres materiales y sin material, en un intervalo de frecuencias entre 300 y 15,000 Hz. En primera instancia, se observan tres intervalos bien definidos; el primero, que corresponde a frecuencias bajas, se extiende de 300 a 1000 Hz, el segundo va de 1000 Hz a 6000 Hz y, el tercero va de 6,000 Hz a 15,000 Hz, el cual corresponde a las altas frecuencias audibles.

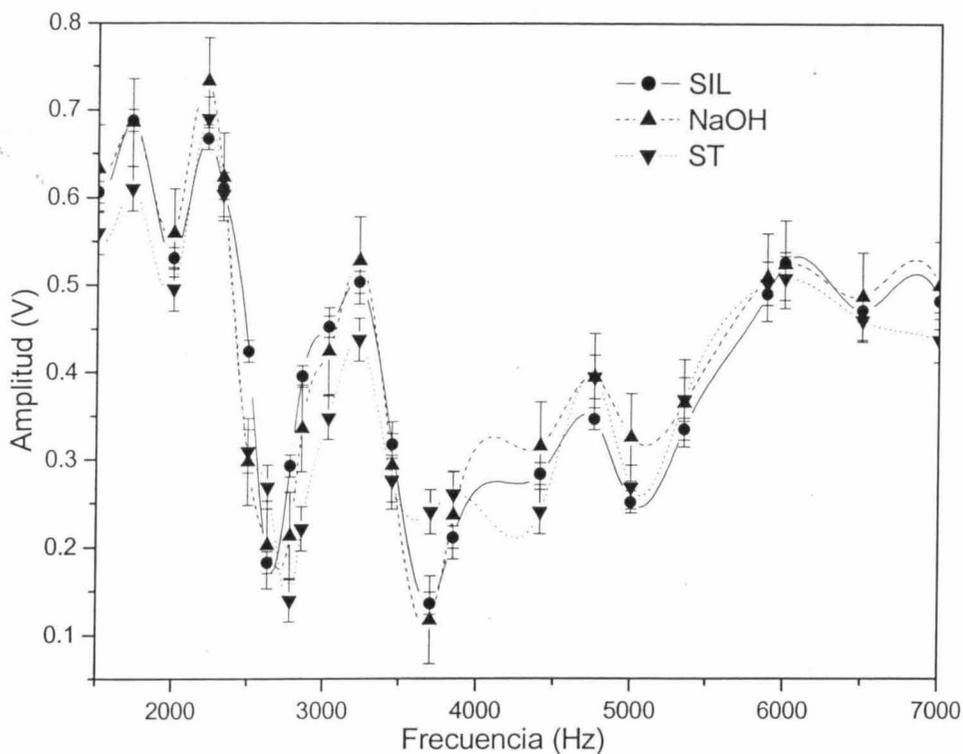
La señal registrada sin material, muestra cambios en su amplitud al variar la frecuencia. En pruebas efectuadas con el generador de señales y el osciloscopio se determinó que la amplitud de salida no varía al modificar la frecuencia de salida, sino más bien varía debido a la distancia fija que hay entre la bocina y el micrófono, esto podría ser atribuido a fenómenos de interferencia que ocurren en ese espacio debido al choque de las ondas con el micrófono.

En el primer intervalo se muestra una atenuación inicial que se mantiene constante al aumentar la frecuencia, hasta alrededor de los 1000 Hz. Esto se debe a que la longitud de onda es lo muy grande, por lo que la placa del material se comporta como una membrana semitransparente. Por lo tanto, la atenuación es debida prácticamente a la distancia, siendo que el material aísla una pequeña fracción constante de la energía de la onda que pasa.



**Figura 4.9a:** Intervalo de amplitud contra frecuencia atribuido a la interfase de los materiales.

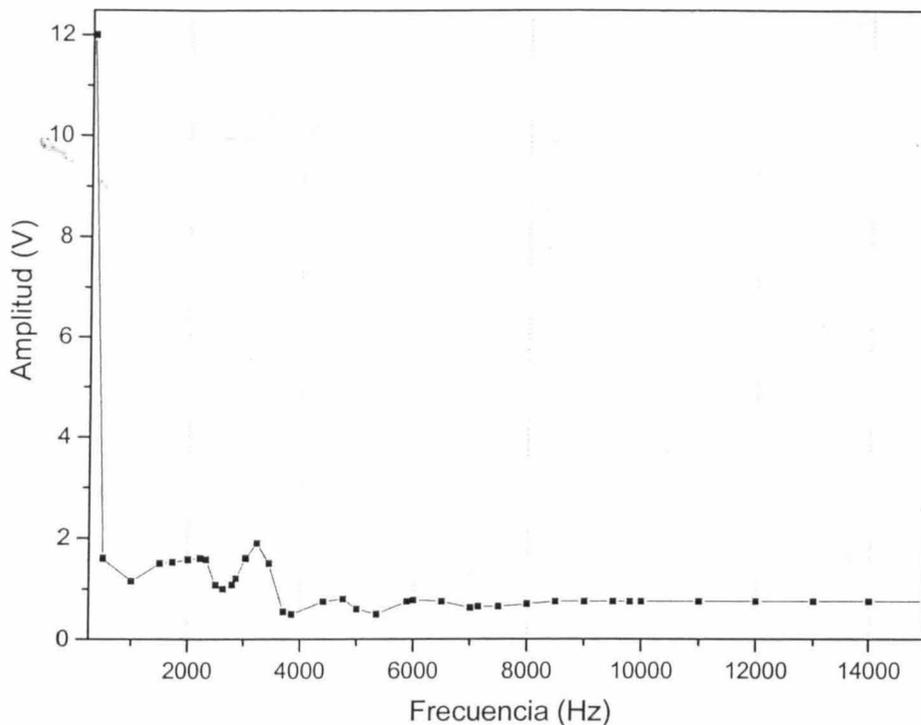
En el segundo intervalo (*Figura 4.9a*) es en donde se presentan las diferencias más notables entre cada uno de los materiales. Éstas podrían ser atribuidas a la interfase, debido a que la composición de los tres materiales es la misma, variando únicamente el tipo de interacción interfacial entre la fibra y la matriz. Alrededor de 2700 Hz se observa un pico hacia abajo donde el material *ST* atenúa más que los otros dos materiales, mientras que para frecuencias alrededor de 3700 Hz se presenta otro pico similar en donde los materiales *NaOH* y *SIL* atenuaron más que el *ST*, posiblemente estas diferencias sean debidas a que se encontró el intervalo de resonancias naturales de las interfases, en donde la onda incidente hace vibrar a la interfase consumiendo parte de la energía. Más allá de estos intervalos, tomando en cuenta el error experimental (*Figura 4.9b*), las señales pueden considerarse similares.



*Figura 4.9b: Intervalo que muestra el error experimental de los tres materiales en la zona de resonancias*

En la *Figura 4.9b* se grafican los errores para cada material y se puede observar como en los picos antes señalados se notan claras diferencias en su capacidad de aislamiento acústico.

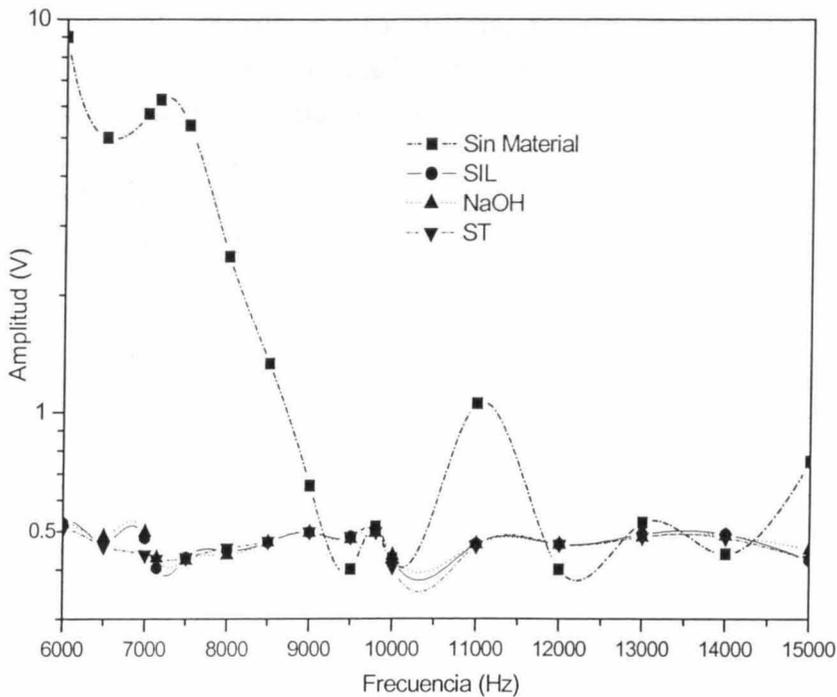
Para un mayor entendimiento de este espectro, se realizaron pruebas de atenuación a una placa de HDPE puro, con la misma geometría para observar su comportamiento. Se encontró que también presenta la misma zona de resonancias que el material compuesto, con la diferencia que los picos son más pequeños y suavizados y, atenúa menos que el material compuesto, como se muestra en la *Figura 4.9c*.



**Figura 4.9c:** Espectro acústico de una placa de polietileno puro.

Esta diferencia de la resonancia entre HDPE y el material compuesto, se debe a que en el HDPE no hay partículas suspendidas en su interior que puedan generar fricción entre la fibra y la matriz así como entre el carbonato y la matriz., ocasionando interferencia o resonar de modos diferentes a los de la placa. Debido a esto, el HDPE presenta una menor atenuación con respecto al material compuesto. Después de pasar la zona de resonancias, en la región 3, se mantuvo una atenuación constante.

El tercer intervalo observado en la *Figura 4.10* se atribuye a la matriz, ya que su frecuencia natural se encuentra en valores relativamente altos que caen dentro de este intervalo. Este intervalo se puede dividir en dos zonas, la que va de 6 KHz a 9 KHz, que es la zona de ley de masas y la que va de 9 KHz a 15 KHz, que corresponde a la zona de coincidencia dejando de ser un buen aislante.



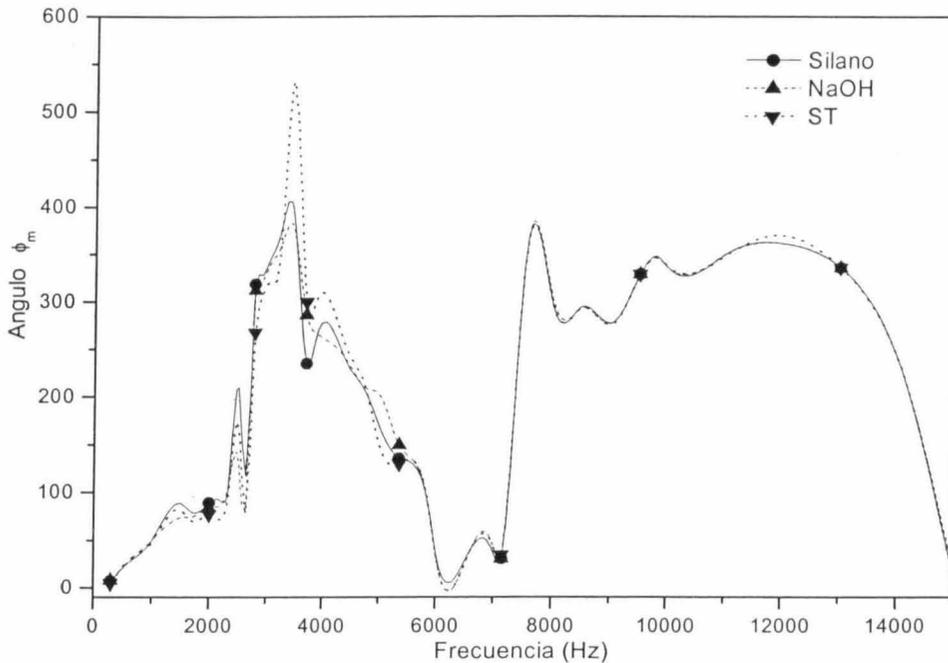
**Figura 4.10:** Intervalo de amplitud contra frecuencia, región donde las propiedades acústicas caen.

En la primera zona se muestra cómo la señal de salida sin material cae de aproximadamente 7 V hasta igualar los valores de las señales atenuadas por los materiales alrededor de 0.45 V, siendo su límite de aislamiento (9.2 KHz), ya que al pasar este límite las ondas de flexión en la placa junto con las ondas mecánicas incidentes (*efecto de coincidencia*) provocan fuertes resonancias en la señal recibida. En la segunda zona (después de 9.2 KHz), se observa una señal de salida menor a las señales que deberían ser atenuadas, lo que significa que la señal es amplificada, esto es debido al fenómeno de coincidencia, lo cual provoca que el material funcione como un radiador acústico [23, 26, 31]. Por lo tanto, su capacidad de atenuación cae drásticamente. Esto lleva a considerar que los materiales resultan adecuados para ser usados como aislantes acústicos para frecuencias entre 1 y 7 KHz, siendo su intervalo óptimo entre 2 y 6 KHz.

El gráfico de la *diferencia de fase debida al material* ( $\phi_m$ ) contra *frecuencia* también responde al efecto de AA como lo muestra la *Figura 4.11*. Este gráfico vuelve a reafirmar el intervalo donde se aprecian cambios notables debidos a la interfase.

En la frecuencia de 3,448 Hz se observa un pico hacia arriba en los tres materiales, siendo el pico del *ST* el más grande que el de los otros dos.

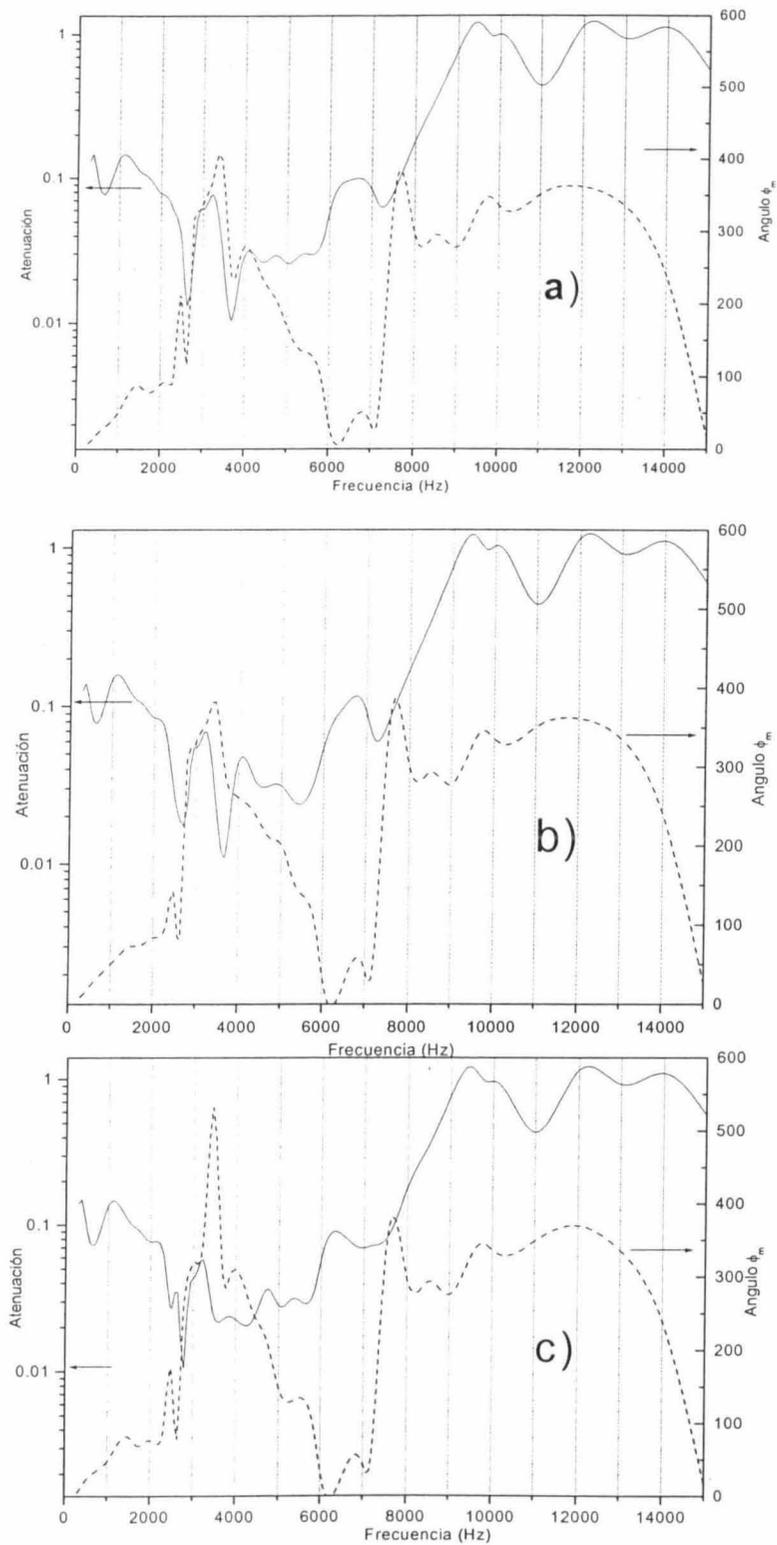
Siguiendo el mismo razonamiento que en el gráfico de *amplitud-frecuencia*, esta diferencia en el tamaño de los picos, puede ser atribuida al nivel de adhesión interfacial que hay para cada uno de los tres materiales. Para el *SIL* y el *NaOH*, se observan picos más cortos y redondeados, posiblemente esto se debe a que el cambio de un medio a otro, puede ser considerado gradual. Por otro lado, cuando la interfase es pobre el pico es más grande debido a que la onda cambia de un medio a otro súbitamente.



**Figura 4.11:** Gráfica de la diferencia de fase como función de la frecuencia.

En el intervalo atribuido a la interfase al observarlo en el gráfico  $\phi_m$  como función de la frecuencia, se encuentra un comportamiento similar al ya antes visto en los espectros de amplitud contra frecuencia (*Figura 4.8*). En las *Figuras 4.12a, b y c* se comparan las señales de amplitud y las señales de la diferencia de fase de cada material, con el fin de ver claramente la relación entre la atenuación y la diferencia de fase. El intervalo alrededor de 2.5 KHz a 4.5 KHz se tienen comportamientos similares en la forma de las curvas, *Kin Ming Ho et al* [24], en su trabajo observaron una relación entre atenuación y fase, al observar un mínimo en las curvas de atenuación, se observaba un punto de inflexión hacia abajo (pendiente negativa) en las curvas de diferencia

de fase, así mismo, cuando se observa un máximo, la curva de fase presenta un punto de inflexión (pendiente positiva).



**Figura 4.12:** Comparación de las señales de amplitud y de diferencia de fase para el material con fibra a) SIL, b) NaOH y c) ST. La línea sólida es la señal de amplitud, la línea punteada es la señal de diferencias de fase.

Con la técnica de *AA* se caracterizaron tres materiales con interacciones interfaciales distintas y, se determinó la capacidad de aislamiento acústico de cada tipo de material, siendo el material *ST* el aislante más efectivo de los tres. Los tratamientos interfaciales si provocaron diferencias en el modo de atenuación del sonido incidido en las placas, viéndose que los materiales con fibras sometidas a tratamientos (*NaOH* y *SIL*) presentaron prácticamente la misma atenuación, mientras que el material con fibra sin tratamiento (*ST*) tuvo una atenuación visiblemente distinta a los otros dos. Cabe señalar que esto solo ocurre en la región de resonancias (entre 2 y 4 KHz), en donde ocurren dos mecanismos de atenuación, la fricción y la interferencia.

En los gráficos de *diferencia de fase vs frecuencia* se observaron las diferencias entre los tratamientos superficiales, los materiales con tratamientos tuvieron un desfase similar mientras que el material *ST* tuvo desfases muy distintos debido a su interacción principalmente mecánica.

La técnica ofrece un gran alcance con la determinación de las frecuencias naturales del material y, su zona de frecuencias de aislamiento efectivo del ruido.

## CONCLUSIONES GENERALES.

Los experimentos efectuados para la caracterización mecánica con *EA* mostraron resultados en los que se definen los elementos de falla en el material, en los gráficos de *duración de eventos acústicos vs. amplitud* (Figuras 3.4b, 3.8 y 3.12) se delimitaron los dominios de falla de cada elemento del material, definiéndose así 4 dominios en los cuales se presentan la creación de grietas en la matriz, la propagación de las mismas, la falla de la interacción interfacial y la ruptura generalizada del material. Posteriormente, estos dominios se identificaron en los gráficos de *frecuencia vs. amplitud* (Figuras 3.5, 3.9 y 3.13) y, de éstos se pasó a la identificación de los dominios en los gráficos de *frecuencia vs. tiempo*, correlacionados al gráfico mecánico de cada material (Figuras 3.6, 3.10 y 3.14). De esta forma se pudo observar el elemento del material que fallaba y en qué tiempo. De forma general, los eventos ocurrían en la zona de deformación plástica, en donde la interfase fallaba a lo largo de esta zona (meseta de carga) con señales de baja frecuencia hasta antes de su ruptura generalizada. La matriz presentó agrietamiento y propagación a la mitad de la zona plástica caracterizadas por señales de mediana frecuencia y, finalmente la ruptura del material registró grandes señales muy características de ésta. Las propiedades mecánicas de los materiales *SIL* y *ST* presentaron cargas máximas similares, mientras que el *NaOH* presentó una carga menor a los otros dos. En el caso de las deformaciones, el que presentó mayor deformación de los tres fue el *ST*. Pero el más uniforme de ellos fue el *SIL*, ya que tuvo una menor variación en sus valores de carga y deformación en sus 3 regiones (*Lado 1, Centro y Lado 2*). En cuanto a los módulos elásticos, al analizarse los tres materiales y las tres regiones de cada material, se encontró que no hay una variación significativa entre ellos (tomando en cuenta el error experimental) por lo cual todos los fenómenos de fallas y agrietamientos ocurren en el comportamiento plástico de los materiales. Esto quiere decir que la interacción interfacial en los experimentos de *EA* solo se manifiesta en éste comportamiento.

Los espectros de *AA* fueron divididos en 3 regiones de propagación como señala la literatura (Figura 4.3). En la región 1 (de 300 a 1000 Hz) los materiales aislantes acústicos son ineficientes, la atenuación mínima observada es principalmente debida a la distancia entre la bocina y el micrófono. En la región 2 (de 1 a 6 KHz), que corresponde a las frecuencias intermedias atribuidas a la interfase, se observó un comportamiento sinusoidal, esto se debe a un efecto de resonancia ocasionada por la masa de la

placa y sus componentes. Además, en esta región se presentan las diferencias notables en la atenuación de las ondas sonoras, en donde el mecanismo de disipación de la energía es principalmente por fricción entre las fibras y la matriz y por interferencia de las ondas.

En la región 3 ocurre el efecto de coincidencia que provoca que las propiedades acústicas de los materiales caigan drásticamente, a estas frecuencias las ondas de flexión coinciden con las de vibración del material y ocurre resonancia, ocasionando que las señales sean amplificadas, así mismo, se observa que las ondas de flexión son interferidas con las de vibración del material y las ondas lo atraviesan sin ganancia ni pérdida.

Para fines prácticos, los tres materiales presentan aislamientos equivalentes en su zona de atenuación óptima (1 a 6 KHz), sin embargo, para fines de caracterización, es posible diferenciar las interacciones interfaciales, ya que se presentan diferencias en los picos de resonancia de esta región.

Inicialmente, se partió de la idea de que ambos experimentos podrían ser correlacionados, puesto que se estaba trabajando esencialmente con frecuencias naturales en ambos casos. En *EA* al romperse las muestras las frecuencias de las ondas liberadas deberían ser las frecuencias naturales de cada componente; mientras que en *AA* al hacerse incidir el tren de ondas en las placas, en principio, se detecta el intervalo de resonancias en donde están incluidas las frecuencias naturales de los componentes. Tales frecuencias naturales debían ser observables y equivalentes en ambos experimentos, sin embargo, debido a la interferencia producida en este intervalo, no fue posible la observación clara de cada elemento y, por lo tanto, la correlación no resultó muy evidente, solo se detectaron intervalos comunes en ambos experimentos debido a las señales mezcladas recibidas por este material tan heterogéneo, siendo una correlación cualitativa.

En los experimentos de *EA*, al fallar la probeta, las frecuencias de las señales detectadas se esperan que coincidan con las frecuencias naturales de cada componente del material. La frecuencia asociada a la interfase se encontró en el intervalo entre 1 y 3 KHz, la matriz se encontró en el intervalo entre 10 y 15 KHz. En el espectro de *AA*, en el único intervalo de los espectros de frecuencias donde se observó una diferencia en la atenuación de las tres muestras, fue en el intervalo entre 2 y 6 KHz justo este intervalo corresponde a la región 2 de resonancias. En este intervalo deben estar reflejadas tanto la interacción interfacial *fibra-matriz* como la interacción *CaCO<sub>3</sub>-matriz*. Pero

como la interacción  $CaCO_3$ -matriz es la misma para los 3 materiales, las diferencias que se observan, podrían ser asociadas a la interacción interfacial *fibra-matriz*. También se puede considerar la interfase *fibra- $CaCO_3$*  puesto que el  $CaCO_3$  al estar recubierto con un agente acoplante, puede formar una interfase con la fibra y, esta interacción también variará con el nivel de adhesión del tratamiento, contribuyendo a las propiedades de atenuación del material compuesto, pero como el tamaño de partícula del  $CaCO_3$  es muy pequeño y su porcentaje en peso es el menor, la contribución de esta interfase no deberá ser muy significativa.

Se puede concluir que tanto *EA* como *AA* muestran la diferencia de las interacciones interfaciales *fibra-matriz*. Como comentario final, en el caso de *EA*, los dominios asociados a la interacción interfacial, corresponden a las dos interacciones tanto de la *fibra-matriz* como del  $CaCO_3$ -matriz, en cambio, en el caso de *AA* las diferencias que se observan podrían atribuirse principalmente a la interacción interfacial *fibra-matriz*.

## APÉNDICE.

### DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ONDA.

La ecuación de onda es la herramienta matemática que sirve para describir el movimiento de una onda en un medio. La propagación de una onda en un medio (puede ser en cualquier medio, en particular se hará para un gas, pero es fácil extenderlo para un líquido o un sólido) se basa en tres mecanismos [11]:

1. Las partículas del gas se mueven por lo que la densidad del gas varía.
2. La variación de la densidad del gas corresponde a una variación en la presión en diferentes puntos del gas.
3. La diferencia de presiones en diferentes puntos del gas, genera el movimiento de las partículas del gas.

Del mecanismo 2 se infiere que la presión es una función de la densidad. Esta función se puede obtener como sigue: Se considera un elemento de volumen en el gas, antes de que llegue la onda sonora existe un equilibrio a una presión  $P_0$  y una densidad correspondiente  $\rho_0$ . En general  $P = f(\rho)$ , en particular, se cumplirá  $P_0 = f(\rho_0)$ . Las variaciones de presión en el gas debido a la perturbación ocasionada por la onda, son pequeñas respecto al valor de equilibrio  $P_0$ , por lo que se puede escribir:

$$P = P_0 + P_e \Rightarrow \rho = \rho_0 + \rho_e \quad (1)$$

La condición que debe tener esta ecuación es:

$$P_e \ll P_0 \Rightarrow \rho_e \ll \rho_0 \quad (2)$$

Por lo que se puede escribir:

$$P_0 + P_e = f(\rho_0 + \rho_e) \quad (3)$$

Por la desigualdad (2) la función de la ecuación (3) se le puede hacer un desarrollo de Taylor alrededor de  $\rho_0$ , quedando:

$$f(\rho_0 + \rho_e) = f(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \rho_e f'(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \rho_e^2 f''(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \dots \quad (4)$$

como  $\rho_e \ll 1$  implica que el término cuadrático es despreciable respecto al segundo término, y con mayor razón a términos superiores, por lo que la serie se puede cortar a partir del tercer término, quedando:

$$f(\rho_0 + \rho_e) = f(\rho_0) + \rho_e f'(\rho_0) \quad (5)$$

De las ecuaciones (3) y (5) podemos escribir:

$$P_0 + P_e = f(\rho_0 + \rho_e) = f(\rho_0) + \rho_e f'(\rho_0) \quad (6)$$

pero como:

$$P_0 = f(\rho_0)$$

$\Rightarrow$

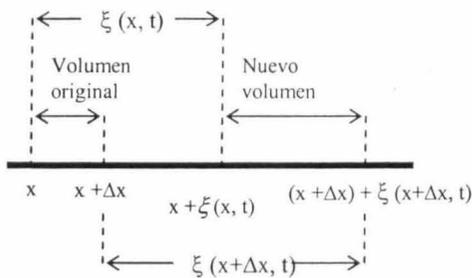
$$P_e = \rho_e f'(\rho_0)$$

Esta ecuación quiere decir que  $P_e$  es proporcional a  $\rho_e$ , por lo que se puede escribir:

$$P_e = k\rho_e \quad (7)$$

donde la constante de proporcionalidad  $k$  es igual a  $f'(\rho_0)$

De la *Figura 1.1* se tiene que  $x$  es la posición de una porción de aire no perturbada por una onda sonora,  $\xi(x, t)$  es el desplazamiento en el tiempo  $t$ , por lo que la nueva posición es  $x + \xi(x, t)$ .



**Figura A.1:** El desplazamiento del aire en  $x$  es  $\xi(x, t)$  y en  $x + \Delta x$  es  $\xi(x + \Delta x, t)$ . El volumen original de aire para un área unitaria de la onda plana es  $\Delta x$ ; el nuevo volumen es  $\Delta x + \xi(x + \Delta x, t) - \xi(x, t)$ .

Para encontrar la variación de la densidad debido al paso de la onda (se consideran ondas planas), se toma la posición no perturbada de una porción vecina de aire  $x + \Delta x + \xi(x + \Delta x, t)$ , entonces la cantidad de aire por unidad de área en  $\Delta x$  es entonces  $\rho_0 \Delta x$ . Cuando este aire es desplazado debido a una onda sonora, queda entre  $x + \xi(x, t)$  y  $x + \Delta x + \xi(x + \Delta x, t)$  de modo que en este intervalo se tiene la misma materia que había en  $\Delta x$

cuando no estaba perturbado.

Si  $\rho$  es la nueva densidad, entonces se tiene:

$$\rho_0 \Delta x = \rho [x + \Delta x + \xi(x + \Delta x, t) - x - \xi(x, t)] \quad (8)$$

Como  $\Delta x$  es pequeño, se puede escribir  $\xi(x + \Delta x, t) - \xi(x, t) = (\partial \xi / \partial x) \Delta x$ . Esta derivada es parcial, puesto que  $\xi$  depende tanto del tiempo  $t$  como de  $x$ . Así, la ecuación queda:

$$\rho_0 \Delta x = \rho \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \Delta x + \Delta x \right)$$

o también

$$\rho_0 = (\rho_0 + \rho_e) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \rho_0 + \rho_e$$

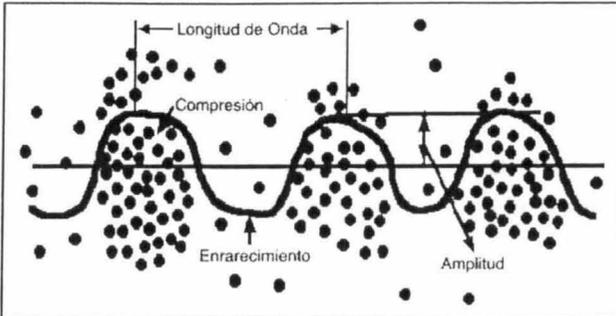


Figura A.2: Mecanismo de compresión y enrarecimiento al paso de una onda sonora.

En las ondas sonoras  $\rho_e$ ,  $\xi$  y  $\partial \xi / \partial x$  son variaciones pequeñas, como consecuencia se obtiene la siguiente relación:

$$\rho_e = -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} - \rho_e \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

De esta ecuación puede desprejarse el término  $\rho_e \frac{\partial \xi}{\partial x}$  ya que será mucho menor que  $\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x}$ .

De esta forma se obtiene la relación necesaria para que se cumpla el *mecanismo 1*:

$$\rho_e = -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (10)$$

Esta es la ecuación enunciada en el *mecanismo 1*. Si los desplazamientos varían con  $x$ , habrá variaciones de densidad. El signo negativo nos indica que si el desplazamiento  $\xi$  aumenta con  $x$ , de modo que el aire se “enrarezca”, la densidad tiene que disminuir, *Figura 1.2*.

A continuación se procede a obtener la tercera ecuación, la cual es la del movimiento producido por la presión. Si se conoce la relación entre la fuerza y la presión, se puede obtener la ecuación de movimiento.

Considérese una “rebanada” de aire de espesor  $\Delta x$  (*Figura 1.3*) y de área unitaria perpendicular a  $x$ , la masa de aire de esta rebanada es  $\rho_0 \Delta x$ . La fuerza que actúa sobre esta materia por unidad de área perpendicular a  $x$ , será igual a  $\rho_0 \Delta x (\partial^2 \xi / \partial t^2)$ . En  $x$  se tiene la fuerza en la dirección  $+x$ , de módulo  $P(x, t)$

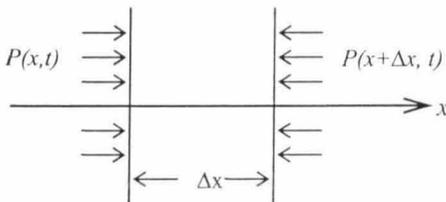


Figura a.3: La fuerza resultante en la dirección  $x$  positiva producida por la presión que actúa sobre un área unitaria perpendicular a  $x$  es  $-(\delta P / \delta x) \Delta x$ .

por unidad de área, y en  $x + \Delta x$  tenemos la fuerza en dirección opuesta, de módulo  $P(x + \Delta x, t)$  por unidad de área.

Así, se obtiene la fuerza resultante

$$\rho_0 \Delta x \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) = P(x, t) - P(x + \Delta x, t)$$

$$P(x, t) - P(x + \Delta x, t) = - \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x = - \frac{\partial P_e}{\partial x} \Delta x$$

Debido a que  $\Delta x$  es pequeño (y por lo tanto despreciable) y que la única parte de  $P$  que varía es la presión en exceso  $P_e$ , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = - \frac{\partial P_e}{\partial x} \quad (11)$$

Con esta última ecuación, es posible interconectar las ecuaciones y reducirlas a una sola variable,  $\xi$ . Se elimina  $P_e$  de (11) usando a (7) y derivándola con respecto a  $x$ , con lo que se obtiene:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -k \frac{\partial \rho_e}{\partial x} \quad (12)$$

Derivando la ecuación (10) y sustituyéndola en la ecuación (12), se puede eliminar a  $\rho_e$ . De este modo se encuentra una simplificación de  $\rho_0$ , como sigue:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = k \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (13)$$

Definiendo a  $c^2 = k$ , se encuentra:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad \text{ECUACIÓN DE ONDA.}$$

Esta ecuación es la que describe el comportamiento del sonido en cualquier medio. Físicamente esta ecuación dice que  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$  representa la aceleración vertical en el punto  $x$ . Por lo tanto, la ecuación se puede interpretar diciendo que la aceleración en cada punto del desplazamiento es debida a la tensión o

amplitud, y que entre más grande sea la concavidad  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$  más grande será la fuerza restauradora. Donde  $c$  es una constante de proporcionalidad. [3-4,8-9]

## REFERENCIAS.

- [1] Tippens “*Física. Conceptos y Aplicaciones*” 3º Edición. Mc Graw Hill. Pag. 437- 469, 1994, México
- [2] H.E. White. “*Física Moderna*” Vol. 1. UTEHA. Pag. 323 – 354. 1982, Cd de México, México.
- [3] Cyril M. Harris. “*Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido*” 3º Edición. Mc Graw Hill. Capítulos 28, 29 - 1ª Parte, 29 - 2ª Parte y 30. 1995. Aravaca, Madrid.
- [4] Stanley J. Farlow. “*Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*” John Wiley & Sons. Pag. 81 – 82, 123 – 125. 1976. New York.
- [5] F. L. Matthews & R.D. Rawlings. “*Composite Materials: Engineering and Science*” CRC Press. Pag 435 – 442. 1999. Abington, England.
- [6] Tim A. Osswald, Georg Menges. “*Materials Science of Polymers for Engineers*” 2ª Edition. Pag. 585 – 590. , Madison, WI.
- [7] R.M. Christensen “*Mechanics of Composite Materials*” Lawrence Livermore Laboratory, Wiley & Sons, pag 225-273
- [8] A.P. French. “*Vibraciones y Ondas*” Editorial Reverté. 2001. NY.
- [9] Lawrence Kinsler, “*Fundamentals of Acoustics*” 4<sup>TH</sup> Edition. Wiley & Sons. 2000. NY.
- [10] G. Odian “*Principles of polymerization*” Wiley & Sons, pag 656-657. 1991, NY.
- [11] Richard P. Feynman. “*Lectures on Physics: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*” Vol. I. Pag 47.1- 47.11. Fondo Educativo Interamericano, 1971, CA.
- [12] A.Valadez-Gonzalez et al. “*Development and characterization of a HDPE-sand-natural fiber composite.*” *Composites Part B*, 28 B, 1997, 331-343.

- [13] A.Valadez-Gonzalez et al. “*Chemical modification of henequén fibers with an organosilano coupling agent.*”  
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Depto de Física.  
Composites Part B, 30, 1999, 321-331
- [14] Sang-II Lee, et al. “*Interfacial properties of glass fiber/brittle ductile dual matrix composites using micromechanical techniques and acoustic emission*”, Polymer composites, February 1999, vol, 20 No.1
- [15] M. Giordano, et al. “*Analysis of acoustic emission signals resulting from fiber breakage in single fiber composite*”, Polymer composite, Vol. 20, No. 6, 1999.
- [16] A. N. Netravali, et al. “*An acoustic emission technique for measuring fiber fragment length distributions in single fiber composite test*”, Composite science and technology, Vol. 35, pag. 13-29, 1989.
- [17] G. Kotsikos, et al., “*Use of Acoustic Emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates*”, Polymer composites, October 1999, vol. 20, No. 5
- [18] Dr. Jaime Pfretzschner. “*Acústica Ambiental*”  
Departamento de Acústica ambiental.  
Instituto de Acústica (IA - CSIC).
- [19] “*Nondestructive Testing Handbook*”. 2<sup>a</sup> Edition. Vol. 5 Acoustic Emission Testing. Pag. 2 – 4, 11 – 18, 45 – 52, 64 – 65.
- [20] Adrian A. Pollock, “*Acoustic Emission Inspection*”, metal hand book, 9<sup>TH</sup> Edition, Vol. 17, pag 278-294, 1989
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/Decibel> “*Wikipedia, The free encyclopedia*”
- [22] M. N. Cazaurang-Martinez, et al. “*Physical and Mechanical Properties of Henequen Fibers*”. A.C. Cordemex Mérida, Yucatan, México. Journal of Applied Polymer Science. Part B. Vol 43, Issue 4, pag 749-756.

- [23] F. Miyara. “*Alternativas para lograr una barrera contra el ruido*”. [http://www.caviplan.org.ar/74\\_17.htm](http://www.caviplan.org.ar/74_17.htm). Vidriotécnica.
- [24] Kin Ming Ho, et al. “*Broadband locally resonant sonic shields*”. Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China
- [25] [http://www.isover.net/asesoria/manuales/edificacion/Acustica\\_aislamiento.pdf](http://www.isover.net/asesoria/manuales/edificacion/Acustica_aislamiento.pdf). “*Manual de Aislamiento en la Edificación*”.
- [26] <http://www.elruido.com>
- [27] [http://www.caviplan.org.ar/74\\_17.htm](http://www.caviplan.org.ar/74_17.htm). “*Vidriotécnica*”
- [28] Roberto Otero Baña. “*El cultivo del henequén (Agave fourcroydes fourcroydes, Lem) como planta textil y su aprovechamiento integral*”. Laboratorio BioFam. La Habana, Cuba.
- [29] <http://www.fiberglasscolombia.com/> “*Notas Técnicas #48 Construcción*”. Fiberglass Colombia S.A. División de Arquitectura.
- [30] [http://www.copital.org/solo\\_colegiados/leyes\\_reglas/nbeca88/anexo1.htm](http://www.copital.org/solo_colegiados/leyes_reglas/nbeca88/anexo1.htm) “*Anexo 1: Conceptos fundamentales, definiciones, notaciones y unidades*”
- [31] Randal Barron. “*Industrial Noise control and Acoustics*”. Editorial Marcel Dekker Incorporated. Pag. 108-114. 2002, Ruston, Louisiana
- [32] Emilio Pérez Pacheco. “*Estudio de la degradación higroscópica de un material compuesto de fibra de carbón y resina*”. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- [33] Olivier Siron, Hiroshi Tsuda. “*Acoustic Emission in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Materials*”. National Institute of Materials and Chemical Research, AIST, MITI, Department of Composite Materials, 1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8565, Japan.

- [34] Juan Carlos Nieto Vargas. “*Estudio del comportamiento estructural de un material compuesto de HPDE-CaCO<sub>3</sub> -Fibra natural*” Tesis de Licenciatura para optar el título de Ingeniero Mecánico. Instituto Tecnológico de Mérida. 1999
- [35] Felipe Augusto Carrillo Sánchez. “*Estudio del envejecimiento acelerado de un material compuesto hecho a base de HPDE-CaCO<sub>3</sub> -Fibra de Henequén*” Tesis de Licenciatura para optar el título de Ingeniero Químico. Instituto Tecnológico de Mérida. 2002
- [36] C. Goffaux, et al. “*Evidence of Fano-like Interferente Phenomena in Locally Resonant Materials*”. Departamento de Física Teórica de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias (C-5), Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, Spain.