

ESTUDIO DE DISEÑO DE UNA CAJA ACÚSTICA DE TIPO CAR-AUDIO, ELABORADA A PARTIR DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MÓDULOS ACÚSTICOS DEL SOFTWARE ANSYS WORKBENCH.

AUTORES:

F.D.Llumiquina,
J.C. Rodríguez, B.N. Muñoz

RESUMEN

El estudio de nuevos materiales utilizados en el campo de la acústica, en especial el desarrollo de materiales compuestos nos permitió desarrollar el proyecto con el fin de determinar los elementos, la matriz y el refuerzo más idóneos, verificando las propiedades mecánicas de los diferentes materiales, para el desarrollo se utilizó fibras naturales (fibras de coco) y sintéticas (fibra de vidrio), así como también analizamos la influencia de la matriz con sus cargas y semicargas (polvo de balsa), con el fin de que este nuevo material pueda reemplazar a los materiales comúnmente utilizados. Para la verificación de estos parámetros y su estudio, se utilizó el programa ANSYS WORKBENCH, con la ayuda del programa CAD se modeló la caja acústica, para ser utilizada en las simulaciones, se generaron tres estudios el primero un estudio modal que nos permitió verificar las frecuencias naturales a las cuales trabajan estos modelos, el segundo un estudio de respuesta armónica con la cual obtuvimos las gráficas de respuesta armónica al desplazamiento y a la aceleración, por último se generó un estudio armónico acústico para determinar la relación entre la caja acústica y el ambiente que le rodea, se simuló una prueba de presión sonora (SPL) misma que es utilizada en los concursos de CAR AUDIO.

PALABRAS CLAVES

Materiales compuestos, Acústica, Ansys Workbench, Respuesta armónica, Análisis modal, spl, cad

ABSTRACT

The study of new materials used in the field of acoustics, especially the development of composite materials allowed us to develop the project in order to determine the most suitable elements, matrix and reinforcement, verifying the mechanical properties of the different materials, For the development, natural fibers (coconut fibers) and synthetic fibers (fiberglass) were used, as well as we analyzed the influence of the matrix with its loads and half-loads (raft powder), with the purpose that this new material can replace to commonly used materials. For the verification of these parameters and their study, the ANSYS WORKBENCH program was used, with the help of the CAD program, the acoustic box was modeled, to be used in the simulations, three studies were generated, the first a modal study that allowed us to verify the natural frequencies at which these models work, the second a harmonic response study with which it was obtained the graphs of harmonic response to displacement and acceleration, finally a harmonic acoustic study was generated to determine the relationship between the acoustic box and the surrounding environment, a sound pressure test (SPL) was simulated which is used in CAR AUDIO contests.

KEYWORDS

Composite materials, Acoustics, Ansys Workbench, Harmonic Response, Modal ansys, Spl, Cad

1. INTRODUCCIÓN

Encontrar un material compuesto que cumpla con las expectativas del mercado permitiendo elaborar cajas de resonancia enfocadas a la calidad de sonido, trabajando en la matriz del material compuesto para asemejar las propiedades que brindan las maderas macizas, al tratarse de un material de fácil conformado permitirá tomar formas más complejas, y comportarse como un solo cuerpo evitando problemas de uniones.

Por definición un material compuesto es básicamente un sistema de materiales formado por dos o más fases distintas, cuya combinación proporciona propiedades que son diferentes y mejores a las de sus constituyentes (Dávila, y otros, 2011), las partes que componen un material compuesto se denominan matriz y refuerzo, mientras que la superficie de conexión entre estos se denomina interfaz. Además, existe la posibilidad de que se adicionen agentes de acoplamiento, rellenos y revestimientos, siendo su principal objetivo mejorar la superficie de la interfaz del compuesto, de tal forma que las propiedades del material se magnifiquen en lugar de verse afectadas, se presenta una imagen que ilustra las partes que constituyen un material compuesto utilizado en la industria aeroespacial y automotriz, además se suele usar en las placas de circuitos electrónicos, en la imagen se puede apreciar un material plástico reforzado con fibras, teniendo como matriz una resina epoxi resistente al calor[1]. El refuerzo son fibras de carbono, las mismas que absorben los esfuerzos generados en el material.



Para el desarrollo del prototipo de caja acústica se procede mediante una técnica de laminado con el fin de garantizar las propiedades acústicas y mecánicas del material compuesto, la primera capa debe poseer una porosidad que permita re direccionar las ondas acústicas impidiendo que estas choquen bruscamente con las paredes de la caja, dicha porosidad debe estar conectada formando una cierta capilaridad para permitir que la presión que ejerce el bajo sea direccionada a la conveniencia del fabricante ya sea hacia un porto en cajas abiertas o para reducir el golpe seco en cajas cerradas mismos que generan distorsión, la segunda capa se la debe construir con una mayor resistencia y densidad para que soporte la presión acústica ejercida por el bajo, con la particularidad que esta capa será la parte estructural de la caja, en este caso se busca la mayor resistencia y menor peso permitiendo así cumplir uno de los objetivos planteados, por último la capa de sellado y afinado de superficie, teniendo en cuenta que al diseñar una caja acústica de tipo cerrada para obtener la mejor calidad de sonido en todas las frecuencias se requiere de un sello hermético de la misma sello que en la segunda capa se obtiene, pero no por completo por tal motivo en esta capa se utilizaran elementos que me permitan cerrar todos los poros y dar un mejor acabado.

ELEMENTOS	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA3
RESINA PROMOVIDA	94%	94%	94%
POLVO DE BALSA	2%	3%	4%
CABOSIL	4%	3%	2%

Tabla 1: Mezclas de componentes

Para la determinación de la mezcla ideal entre resina promovida, polvo de balsa y cabosil no existe un proceso pre establecido, ni una fórmula que determine la proporción adecuada de los componentes, por lo que se

tomara como referencia el siguiente cuadro de mezclas para poder generar las probetas para ser ensayadas.



Figure 2. Obtención del compuesto

Se realizan seis probetas por cada mezcla dando un total de dieciocho probetas ensayadas, con las medidas y especificaciones de la norma ASTM C127-15 que permite identificar el peso específico y el porcentaje de absorción de agua, obteniendo los siguientes resultados.



Al revisar los datos nos podemos percatar que la muestra 2 presenta las propiedades más altas de esfuerzo máximo a la tensión y modulo elástico a medida que se aumentan más cargas a la mezcla (polvo de balsa) sus propiedades mecánicas disminuyen.

Con estos resultados realizamos un comparativo entre las tres mezclas para determinar cual tiene menor peso específico



Gráfico 1 . Comparación de peso específico

De los resultados obtenidos podemos apreciar que la mezcla uno es el menor peso específico esto se debe a que en su composición lleva más cabosil que polvo de balsa y por otra parte a medida que aumenta la concentración de polvo de balsa aumenta el peso específico.

En el siguiente gráfico se aprecia cuál de estas mezclas tiene una mejor capilaridad gracias al valor de absorción de agua.



Gráfico 2. Absorción de agua por muestra

Como resultado de este ensayo podemos advertir que la capilaridad aumenta con la elevación del porcentaje de polvo de balsa como resultado se obtiene que la muestra 3 es la de mejor capilaridad.

Basados en los resultados seleccionamos a la mezcla número tres como la mejor opción, aunque esta no tenga un esfuerzo máximo a la tensión elevado se aprecia que es el que mejor capilaridad tiene y por estar en la primera capa se sugiere la utilización de este compuesto.

En el segundo nivel de nuestra caja se requiere materiales que proporcionen resistencia a la caja evitando deformaciones y posibles rupturas de la misma, así como también forman parte estructural, debiendo llevar a los bajos, por lo que se busca formar un material reforzado con fibras, pero de bajo peso para llevar a cabo la finalidad del proyecto.

El material de refuerzo puede presentarse en forma de fibra corta, fibra continua, tejido o mat (no tejido) y es adicionado en un porcentaje en volumen del 40%. Se han observado porcentajes de espacios vacíos (burbujas de aire atrapadas) de un 15%. Las fibra a utilizar en este proyecto son, refuerzo es la fibra de vidrio esta opción se la toma debido a su bajo costo la presentación más común que se puede encontrar en el mercado es forma de mat, esto favorece a la técnica de fabricación utilizada por la facilidad de acoplarse a distintas formas de la pieza y por otro lado utilizaremos una fibra de carácter vegetal la cual está basada en fibras continuas y corta de coco en un porcentaje en volumen del 40%, pudiendo observar porcentajes de espacios vacíos de un 15% similar a la fibra de vidrio[3].

Para realizar las probetas a ser ensayadas se utilizan cantidades de fibras similares y longitud parecida puesto que la fibra de vidrio que obtuvimos en el mercado es del tipo no tejido con lo que la disposición de las fibras no tiene una dirección ni un orden, en cambio la fibra de coco nos permite direccionar las fibras el

inconveniente es su tamaño.

Se generaron seis probetas por material con un total de doce ensayos a tracción además de pruebas de peso específico y porcentaje de absorción.

3. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

Antes de ejecutar el análisis de elementos Finitos en el software es necesario realizar una introducción sobre las ecuaciones utilizadas en el programa para el debido sustento matemático. Partiendo de la ecuación característica del Movimiento Armónico Simple (MAS) (BLELLOCH 2006).

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega_0^2 y$$

Partiendo de un análisis dinámico de un objeto donde el desplazamiento (Y) respecto a una posición de equilibrio y la frecuencia angular (ω_0), el objeto tendrá un MAS, esta ecuación nos permite relacionar la aceleración y el desplazamiento respecto a la posición de equilibrio de un objeto (BLELLOCH 2006).

Utilizando una onda armónica, el movimiento de cada elemento del medio respecto al tiempo corresponde a un MAS, al desarrollar la fórmula, utilizando el parámetro de la Conservación de la Energía se obtiene la siguiente ecuación:

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

Cuando el análisis se realiza en una sola dimensión, se obtiene una relación como la indicada en la fórmula anterior se concluye que se trata de una onda viajando sin dispersión en el medio.

Al concentrar la energía en un punto determinado de un recinto, debido a la interacción de esta onda con el medio se puede obtener varias ondas tales como: axiales, tangenciales y/u oblicuas, dependiendo si el recinto que las contiene es de 3 dimensiones, a este fenómeno lo podemos explicar mediante el cálculo de modos de vibración para un recinto. Para un recinto de geometría regular se puede utilizar la siguiente ecuación (BLELLOCH 2006).

$$f_{k_3m_3n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

Esta ecuación permite determinar la frecuencia de vibración para recintos de geometría regular donde (L) representa las dimensiones del recinto en metros, (k, m y n) representan valores enteros que son denominados como Nodos Propios.

La interacción de estos nodos es inevitable y tienen relación con la longitud del recinto, para esto se utiliza la figura 45 que se muestra a continuación:

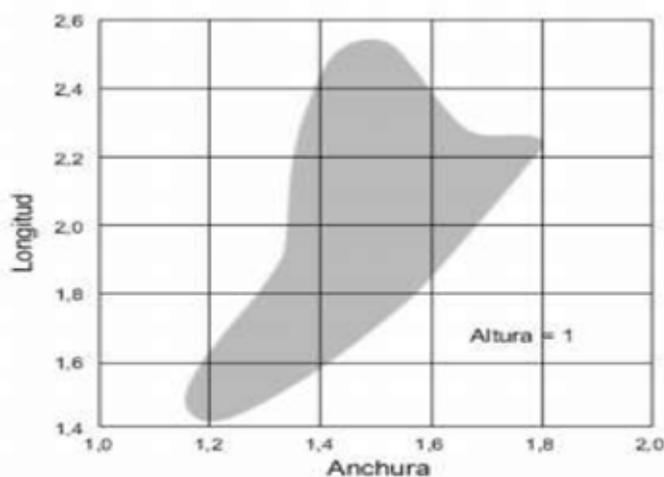


Figura 4. Relación recomendada entre dimensión de un recinto rectangular [4]
Fuente: (Carrión Isbert, 1998).

En la figura antes mencionada se considera una altura igual a 1 para tener una interacción entre el largo y ancho recomendado por Bolt, siendo la región sombreada la representación de una distribución uniforme.

Si la densidad de los nodos propios es demasiado grande que puede ser imperceptible se puede calcular mediante la fórmula de Schoroeder.

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}}$$

Esta fórmula permite relacionar la frecuencia en la que trabaja dependiendo del volumen (V) donde se aloja y el promedio del valor del tiempo de reverberancia (RT) en un rango de 500 a 1 Hz en 1 segundo.

Utilizando el principio de Conservación Mecánica y Termodinámica se tiene un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, mismas que describen el movimiento de un fluido cargado. La ecuación de Navier-Stokes permite calcular los niveles de presión sonora a través de un fenómeno turbulento.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu(e_{ij} - \Delta\delta)]$$

De esta ecuación se puede relacionar la densidad con las componentes características de la velocidad (ui), las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo (Fi), la presión del fluido (p), la viscosidad dinámica (μ) y la divergencia del fluido.

Existen varias condiciones de carga que se pueden aplicar a un sistema, estas pueden ser: Puntuales (presión, gravedad), Cargas térmicas,

Desplazamientos forzados, flujos de calor, entre otros. El estudio de estas condiciones se facilita gracias a la utilización de un programa de elementos finitos, el cual permite la interacción de estos y otros elementos.

El modelo matemático planteado en las ecuaciones básicas de dinámica de fluidos presenta las siguientes fórmulas: Ecuación de continuidad y Ecuación de Cantidad de Movimiento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{V} \cdot \rho \bar{V} = 0$$

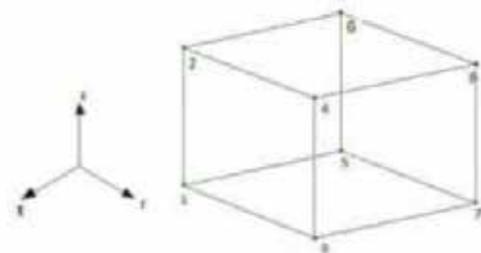
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \bar{F} \bar{M} - \bar{V} P + R + \mu (\bar{V}^2 \bar{V} + \bar{V} (\bar{V} \cdot \bar{V}))$$

De estas dos ecuaciones se desprende la densidad de fluido (ρ), la velocidad de las partículas (V), la presión (P), la aceleración de las partículas (FM) y el coeficiente de viscosidad (μ).

Si se asume las siguientes restricciones ($\mu=0$), por tratarse de un fluido no viscoso como es el aire, la densidad varía ligeramente con el tiempo, al mantener la densidad constante de la caja y si se asume que la fuerza de gravedad y la fuerza de rozamiento es despreciable se puede concluir en la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}$$

Para la determinación de las frecuencias naturales y los nodos del sistema utilizamos un análisis MODAL, basado en la ecuación del movimiento para un sistema acústico <http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/313>.



Si se asume las siguientes restricciones ($\mu=0$), por tratarse de un fluido no viscoso como es el aire, la densidad varía ligeramente con el tiempo, al mantener la densidad constante de la caja y si se asume que la fuerza de gravedad y la fuerza de rozamiento es despreciable se puede concluir en la siguiente ecuación:

La ecuación que se presenta a continuación hace referencia a la variación lineal de la presión acústica, donde la presión se expresa en términos de los coeficientes generalizados ($a_1 \dots a_n$), que gobiernan la contribución de cada uno de los términos poligonales simples

$$\rho = a_1 + a_2 r + a_3 s + a_4 t + a_5 rs + a_6 rt + a_7 st + a_8 rst$$

Al relacionar los nodos individuales con la presión acústica se puede lograr un posicionado dando valores de frontera para cada presión nodal, lo cual presenta 8 ecuaciones con 8 variables que al ser resueltas nos da como resultado la ecuación de Helmholtz en 3 dimensiones.

$$\left([S] - \frac{\omega^2}{c^2} [R] \right) \{P\} = 0$$

Esta ecuación solo se puede utilizar para recintos de sección rectangular y ductos, motivo por el cual procederemos a realizar la simulación de presión acústica en un entorno rectangular.

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K] \{p\}) = \{f\}$$

De esta ecuación general obtenemos la masa (M), la matriz de amortiguamiento (C), la matriz de rigidez (K), el vector de la presión nodal (p) y la carga acústica aplicada al sistema (f) [http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/313.](http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/313)

Para calcular la respuesta armónica de un sistema se utiliza un análisis armónico, mismo que puede ser calculado por 2 métodos, el primero es de la suma modal o también conocido como de superposición y el método completo.

$$\{u\} = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K] \{p\})^{-1} = \{f\}$$

Esta ecuación combina las matrices de amortiguamiento (C), rigidez (K), masa (M) y el vector de carga (f) para cada desplazamiento nodal (u).

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CAJAS ACÚSTICAS

Para determinar el desempeño de una caja acústica tradicional elaborada netamente con madera para poder ser comparada con el desempeño de cajas acústicas utilizando materiales compuestos (fibra de coco y fibra de

vidrio con polvo de balsa), para determinar cuál de estas se asemeja o mejora las características de la caja patrón.

Se realiza un estudio con los 3 materiales tales como madera, fibra de coco y fibra de vidrio con polvo de balsa y los 3 módulos de análisis como son: Modal, Respuesta armónica y Harmonic Acoustic, tal como se muestra en la siguiente figura.

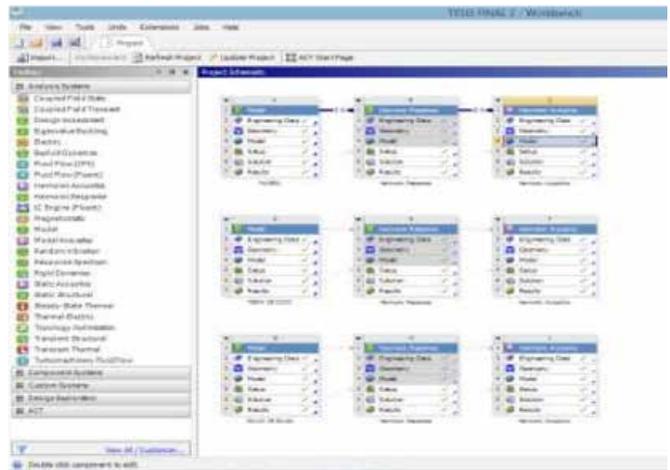


Figura 5 Estudios comparativos:

Los resultados del análisis modal de los 3 tipos de caja, teniendo como resultado la deformación total a las diferentes frecuencias típicas de cada elemento, siendo la frecuencia de la madera 4805 Hz con una deformación total de 6,6 mm, la fibra de vidrio con polvo de balsa con una frecuencia de 4669,4 Hz, con una deformación total de 6,01mm., y la fibra de coco con una frecuencia de 5856Hz con una deformación de 6,36mm.

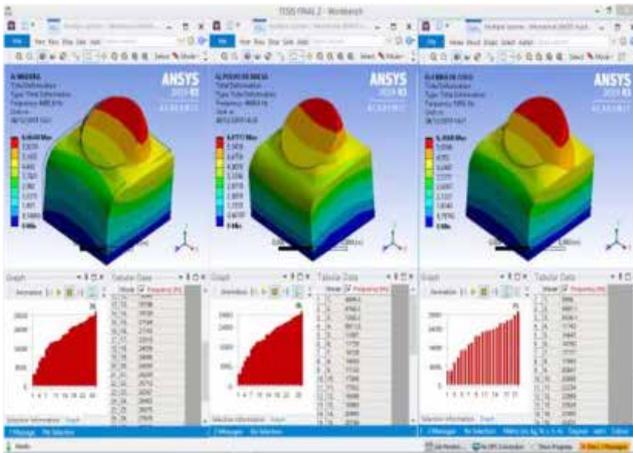


Figura 6 Estudio comparativo del análisis modal

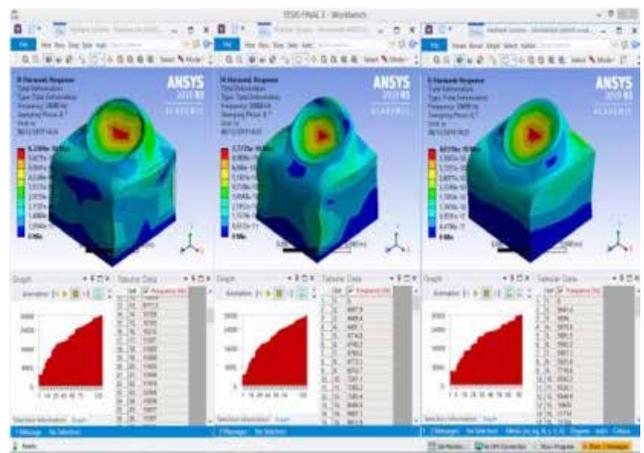


Figura 7. Análisis de respuesta armónica por cada material

Se puede concluir que la madera es la que mayor deformación tiene trabajando en una frecuencia intermedia, la que mejores prestaciones nos entrega es la realizada en fibra de coco, esto se debe a que tiene una deformación similar a la madera trabajando con frecuencias más elevadas respecto a la caja tradicional de madera.

De este análisis se puede sacar como conclusión que mejor desempeño tiene la caja elaborada con fibra de coco, seguida de la caja de madera y quedando en último lugar la caja elaborada con fibra de vidrio y polvo de balsa. Se detalla los gráficos de respuesta de la respuesta armónica con relación a la deformación de los 3 elementos.

El siguiente análisis hace referencia a la respuesta armónica de la membrana del parlante con relación a la caja, entre mayor deformación tenga la membrana menor calidad de sonido presentará la caja, puesto que la caja acústica absorbe más cantidad de ondas sonoras, se obtiene los siguientes resultados considerando que la frecuencia de trabajo de la membrana es de 30000 Hz.

La caja acústica de madera tiene $6,3 \times 10^{-10}m$, la caja de fibra de vidrio con polvo de balsa tiene $7,7 \times 10^{-10}m$ y la fibra de coco $4,03 \times 10^{-10}m$

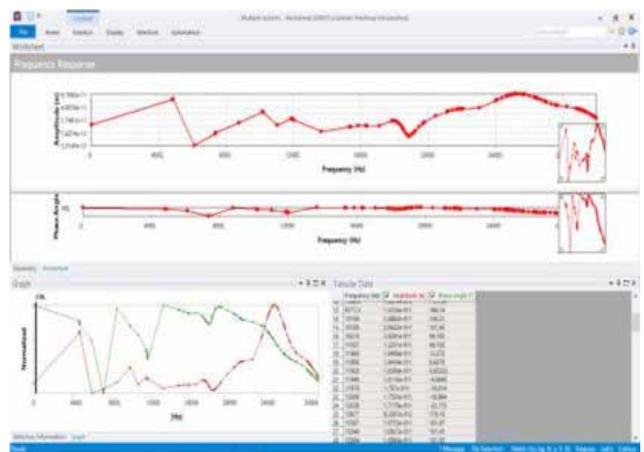


Figura 8. Respuesta armónica con respecto al desplazamiento de la caja de madera



Figura 9. Respuesta armónica con respecto al desplazamiento de la caja de fibra de vidrio con polvo de balsa



Figura 11 Respuesta armónica con respecto a la aceleración de la caja de madera

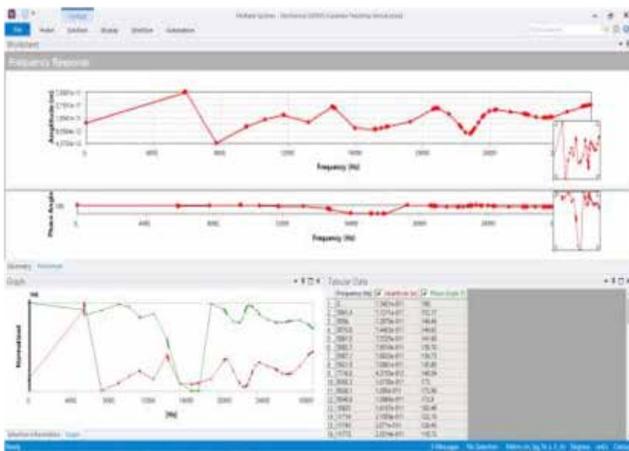


Figura 10. Respuesta armónica con respecto al desplazamiento de la caja de fibra de coco



Figura 12. Respuesta armónica con respecto a la aceleración de la caja de fibra de vidrio con polvo de balsa

De estas tres gráficas podemos determinar el comportamiento de las cajas en los diferentes rangos de frecuencia, teniendo una gran similitud entre la caja de madera y la caja elaborada con fibra de coco, lo mismo se puede apreciar en el análisis de la respuesta armónica con respecto a la aceleración que se detalla a continuación.

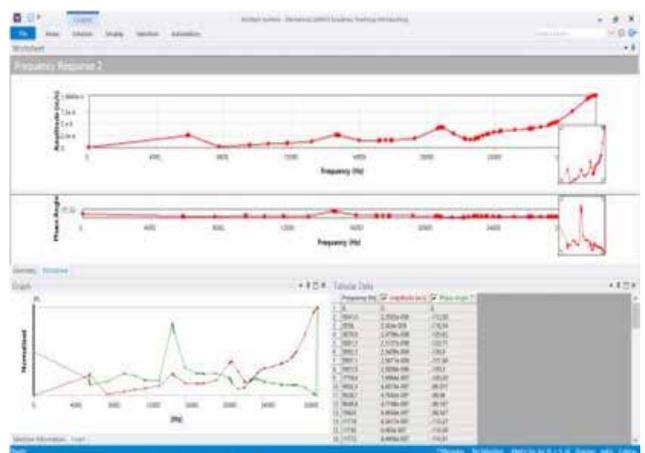


Figura 13. Respuesta armónica con respecto a la aceleración de la caja de fibra de coco

Utilizando el módulo Harmonic Acoustic permite determinar la influencia del as ondas con relación al medio y a la parte interna de la caja, teniendo como resultado una mejor propagación de onda en la caja de madera, lo que no ocurre en las dos cajas de material compuesto, en este caso las dos tienen una distribución más puntual con una ligera ventaja la caja de fibra de coco con relación a la de fibra de vidrio con polvo de balsa.

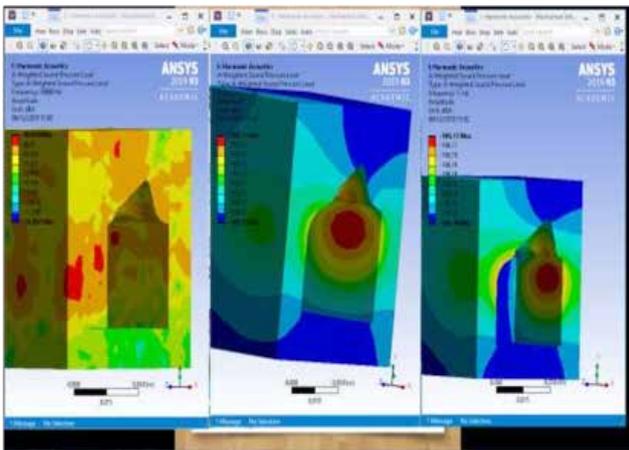


Figura 14. Análisis Harmonic Acoustic de las cajas acústicas

Se puede concluir que se obtiene una mejor propagación de ondas acústicas en la caja de madera, muy difícil de alcanzar, sin embargo, la que mejor resultados presenta es la caja hecha a base de fibra de coco esto se debe a que posee una mayor amplitud de onda, este desempeño se puede mejorar utilizando elementos de aislamiento acústico como es el caso del algodón, la esponja o del material compuesto analizado en los primeros capítulos referente al aislamiento acústico.

Finalmente se presenta un comparativo de la prueba de presión sonora (SPL), en los tres tipos de caja, teniendo como resultados 46,6 dB la caja de madera, 39,1 dB la caja de fibra de vidrio con polvo de balsa y 46,5 dB, la caja de fibra de coco.

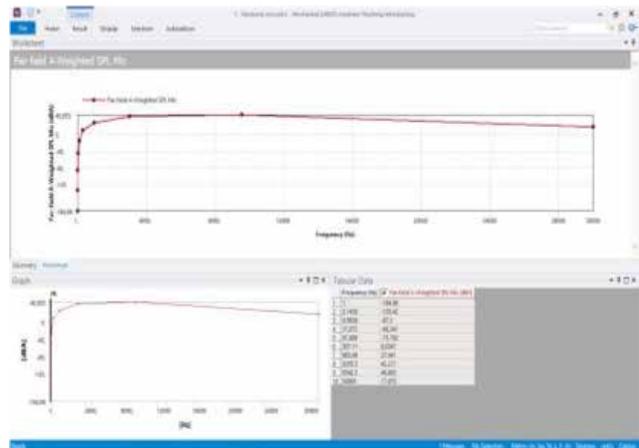


Figura 15. SPL caja de madera

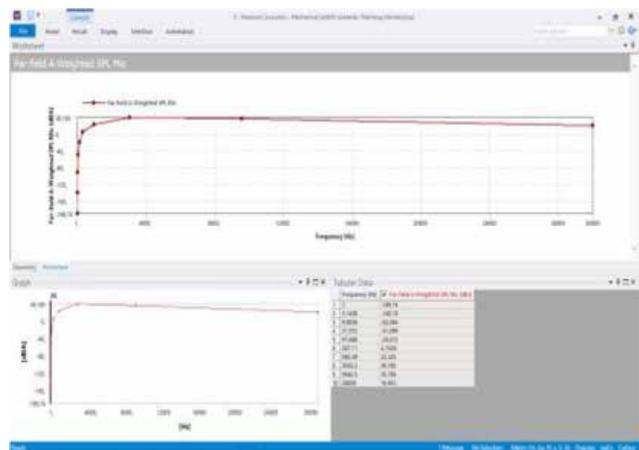


Figura 16. SPL caja de fibra de vidrio con polvo de balsa

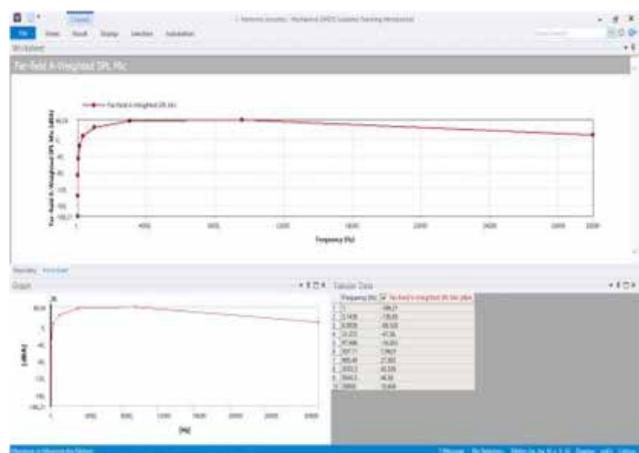


Figura 17. SPL Caja de fibra de coco

El estudio de la presión sonora muestra que la caja de madera y la caja realizada con fibra de coco trabajan casi a los mismos dB, lo que no sucede con la caja de fibra de vidrio con polvo de balsa.

5. CONCLUSIONES

El gran avance que se ha tenido en la obtención de nuevos materiales compuestos permiten generar elementos que compitan con los tradicionales en áreas en las cuales llevan una gran ventaja los materiales clásicos como es el caso de la madera en el área acústica, hace algunos años atrás no se ponía a discusión el cambio de estos materiales, en la actualidad estos materiales compuestos ya generan una competencia y son más aceptados entre el público que prefiere la calidad de sonido antes que la potencia acústica.

Para determinar la matriz que mejores prestaciones entregue es importante determinar el trabajo que va a realizar este elemento, en el caso de la calidad de sonido, se requiere un elemento que tenga una buena densidad y además que tenga cierta porosidad para absorber el golpe de la onda acústica y direccionarla a conveniencia del fabricante.

Se pueden generar ensayos que colaboren con información, aunque estos no sean específicos del área acústica, para este estudio se realizaron pruebas de absorción para determinar el grado de capilaridad de cada compuesto nuevo, estos ensayos permitieron determinar el material que más se asemeja a la madera como un elemento de aislamiento acústico.

El uso del software de elementos finitos permite establecer parámetros que ayudan a comparar el desempeño de los diferentes prototipos,

así como también, la identificación de puntos críticos y zonas a ser mejoradas.

Una vez generado el análisis del desempeño de las 3 cajas podemos concluir que existen materiales compuestos que igualan y en ocasiones superan a los parámetros determinados por la caja de madera, pero en calidad de sonido existe aún una gran diferencia entre estos elementos.

6. RECOMENDACIONES

Una vez identificados las zonas críticas de los elementos simulados se pueden generar las siguientes recomendaciones.

Para alcanzar un mejor desempeño de las cajas de materiales compuestos, se debe utilizar elementos adicionales que ayuden a reforzar la estructura, que entreguen un mayor grado de aislamiento acústico.

En el programa de elementos finitos Ansys con relación a los módulos de simulación acústica existen elementos que poseen las mismas características que los elementos de aislamiento acústico, se recomienda la utilización correcta de estos para generar datos aún más reales.

Este estudio basa su análisis en el material que compone cada caja, se recomienda que para estudios futuros se profundice en el entorno en el cual funcionarán estos elementos (forma más detallada de los habitáculos de los diferentes vehículos).

BIBLIOGRAFÍA

[1] **Boutin, C., Royer, P., & Auriault, J. (1998).** Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. International Journal of Solids and Structures. January, vol. 35, no 34-35, 1998 (522p.), vol. 35, no 34-35, (522p)..

[2] **Callister, W. (2007).** Materials Science and Engineering: An introduction. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

[3] **Dávila, I. J., Galeas, I. S., Víctor Hugo Guerrero, P., Pontón, I. P., Rosas, I. N., Sotomayor, I. V., & Valdivieso, I. C. (2011).** NUEVOS MATERIALES: APLICACIONES ESTRUCTURALES E INDUSTRIALES. QUITO: IMPREFEPP.