



Análisis de modos normales de vibración en los modelos isotrópico y ortotrópico de la membrana timpánica

R. A. Martínez-Celorio,*
Humberto Rodríguez Bravo,*
Rafael A. Rodríguez Cruz,*
R. Castro-Sánchez,*
Luis Martí-López,**
A. Vega Corona*

* Facultad de Ingeniería Mecánica
Eléctrica y Electrónica (FIMEE),
Universidad de Guanajuato.

** Centro de Aplicaciones Tecnológicas
y Desarrollo Nuclear, CEADEN

Correspondencia:
Rene Alfredo Martínez-Celorio
Tampico 912, Col. Bellavista, Salamanca,
Gto., México, 36730.
E-mail: rcelorio@salamanca.ugto.m
Tel. +52 464 6480911

Artículo recibido: 1/febrero/2007
Artículo aceptado: 30/octubre/2007

RESUMEN

Un análisis de los modos normales de vibración usando el método de elemento finito (MEF) para los modelos isotrópicos y ortotrópico de la membrana timpánica es propuesto. Este análisis se realizó sobre un tímpano humano que fue previamente digitalizado para reconstruir su geometría y estudiar sus modos normales de vibración mediante un programa de MEF (ANSYS). Al programa se le incorporan las propiedades mecánicas que caracterizan a cada una de las partes de la membrana timpánica y para aproximar a la realidad se adicionan restricciones que modelan el contacto de la misma con el hueso temporal así como restricciones debidas a la presencia del martillo. Por esta razón, tres modelos (isotrópico con y sin restricción y ortotrópico) son analizados, los cuales establecen diferencias en el cálculo de los modos normales de vibración y que permiten comparar los resultados obtenidos. La importancia de este estudio radica en un mejor conocimiento del funcionamiento de la membrana timpánica para la construcción de dispositivos que permitan reproducir su funcionamiento.

Palabras clave: Membrana timpánica, modos de vibración, método de elemento finito.

ABSTRACT

An analysis of vibrational model by using Finite Element Method (FEM) of isotropic and orthotropic models of the eardrum is proposed. A human eardrum was digitized for reconstructing its geometry and be able to study the vibrational modes by means of a FEM program. The mechanical properties in each one of eardrum parts can be added inside the program to look like a real situation and simulate also the membrane connection to temporal bone as well as the contact between manubrium and malleus. Three models were analyzed, these are: isotropic where was considering contact or not between malleus and manubrium and the model orthotropic with mechanical properties distributed in radial and azimuthal directions. The models allow to analyze how influence of these changes on the vibrational modes. Advantages and disadvantages are discussed.

Key Words: Tympanic membrane, Vibrational modes, Finite elements method.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema auditivo constituye uno de los sistemas más complejos del organismo humano. Éste consta de tres partes (oído externo, medio e interno) cada una con su específica función. El oído externo, por ejemplo, tiene la función principal de captar las ondas sonoras en el aire y conducir las al oído medio. Por su parte, el oído medio se encarga de convertir la onda mecánica de presión en una onda mecánica que se propaga en un sólido dado por la cadena oscicular (martillo, yunque y estribo) hacia el oído interno, el cual funciona como un transductor y convierte la onda en un estímulo nervioso que es conducido al cerebro a través del nervio auditivo.

Los estudios del sistema auditivo datan desde la época de Aristóteles (384 – 322) AC quien ideó la primera aproximación para la descripción del mismo. Él explicó que la estructura interior de la oreja es como una placa espiral refiriéndose claramente al laberinto y mencionó un pasaje del oído interior a la raíz de la boca, dándose de esta manera la primera referencia del tubo de Eustaquio. Sin embargo, se tuvo que esperar hasta el siglo XVI para tener una descripción anatómica del oído medio, cuando Vesalius describió que éste se encuentra compuesto por martillo y el yunque. Por otro lado, Eustaquio hizo la primera descripción completa del músculo tensor del tímpano y del tubo que conecta el oído medio con la faringe, que lleva su nombre. Otros aportes a la anatomía del oído se muestran en las obras de Ingrassia y Varolius quienes descubrieron al estribo y al estapedius, respectivamente.

Luego de 250 años, se comenzó una seria investigación sobre las funciones de las partes del oído medio descubiertas en los trabajos anteriormente citados. Por ejemplo en 1874, Mach y Kessel¹ observaron con una lupa la deformación de la membrana timpánica (MT) bajo presión estática, para lo cual utilizaron un equipo estroboscópico de iluminación que permite estudiar las vibraciones de la MT y de la cadena oscicular. Por otro lado, Helmholtz² publicó su primera teoría acerca de la MT, donde propuso que ésta se encuentra formada básicamente por fibras.

Después de estos primeros descubrimientos y apoyados en el desarrollo de la mecánica Newtoniana, la acción elástica y la rotación del martillo captó la atención de muchos investigadores para hacer estudios usando estas teorías; por ejemplo: Dahman³, investigó la rotación del martillo bajo una

presión estática midiendo el pequeño cambio de inclinación con espejos colocados en el canal auditivo. Siguiendo sus pasos, Von Bekesy⁴ encontró que la MT vibra como una placa rígida. Un paso significativo en la investigación del movimiento de la MT fue hecho por Tonndorf et al.⁵, quienes usaron métodos de interferometría holográfica para comprobar la curvatura de la MT propuesta por Helmholtz, refutando así el trabajo de Von Bekesy. En la actualidad, nuevas técnicas permiten medir vibraciones submicroscópicas de la MT en frecuencias superiores a 5 KHz. Por ejemplo, Willemin et al.⁶ pudieron medir amplitudes de vibración de 10⁻⁹ m usando un interferómetro heterodino y Decraemer et al.⁷, quienes midieron pequeñas vibraciones en celdas individuales receptoras en la cóclea.

Junto a las mediciones experimentales descritas anteriormente se han realizado intentos de construir modelos matemáticos de la MT y de los sistemas del oído medio. Actualmente existen varios de estos modelos que han sido proporcionados por Zwillocki⁸, Matthews⁹ y por Shaw^{10,11}. Estas construcciones han sido modeladas usando la técnica de los métodos de elemento finitos (FEM, por sus siglas en inglés), donde tanto las partes geométricas como las propiedades mecánicas de la misma han sido modeladas para realizar dicho estudio.

Con el objetivo de tener una mejor exactitud de las modelaciones que se usan para estudiar el comportamiento del oído y así poder diseñar mejores prótesis, los científicos han tratado constantemente de mejoras en sus modelos matemáticos y físicos, ya que normalmente estos modelos necesitan de datos de entrada, los cuales son introducidos en los modelos mediante suposiciones en muchos casos o hechos con bajas precisiones. En este sentido podemos citar trabajos como el realizado por J. Fay et al.¹², los cuales utilizan un modelo para obtener el módulo de elasticidad del colágeno; además, hacen una reinterpretación teórica usando de la tensión y los resultados experimentales de la prueba de flexión y para esto usan una estructura laminada del medio. Por otro lado, M. Gaihede¹³, quienes midieron el módulo de elasticidad localmente para personas jóvenes y mayores.

En este artículo se presenta un estudio de los modos normales de vibración de la membrana timpánica humana mediante el método de elemento finito (FEM), sobre tres modelos diferentes isotrópico sin restricción de martillo, isotrópico con restricción y ortotrópico. La importancia de este estudio radica en un mejor conocimiento del funcionamiento de la membrana timpánica para la construcción

de dispositivos que permitan reproducir su funcionamiento, ya que permite discernir la influencia que tiene para la membrana timpánica el aumento de su rigidez, así como la variación de sus propiedades mecánicas en diferentes direcciones. Este trabajo ha sido estructurado en cuatro secciones. En la sección 2, se presenta un breve análisis de la MT, su digitalización y las características del modelo. En la sección 3 se muestran y discuten los resultados obtenidos. Finalmente en la sección 4, se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. DETALLES DEL MODELO

La generación de sensaciones auditivas en el ser humano es un proceso extraordinariamente complejo, el cual se desarrolla en tres etapas básicas. Estas etapas son: Captura; conversión y procesamiento. Las etapas de captura y conversión se llevan a cabo en el oído propiamente dicho y es donde la onda sonora viajera se convierte en un estímulo nervioso que viaja por el nervio auditivo al cerebro. Por su parte la etapa de procesamiento se lleva a cabo completamente en el cerebro donde son identificados los diferentes sonidos para tomar acción.

Uno de los elementos fundamentales en la etapa de captura y conversión es la MT, la cual se encuentra al final del canal auditivo y constituye el primer elemento del oído medio. A continuación se presentan las características de la misma.

2.1 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEMBRANA TIMPÁNICA

El oído medio está constituido por una cavidad llena de aire, donde se aloja la cavidad timpánica, dentro de la cual se encuentran tres huesecillos, denominados martillo, yunque y estribo que están unidos entre sí en forma articulada. El perfil de esta cavidad es irregular y uno de sus extremos está cerrado por una membrana muy delgada conocida como membrana timpánica.

La MT tiene un diámetro y espesor aproximado¹² de 0.9 mm y 0.1 mm, respectivamente. En la Figura 1 se muestra una vista frontal (a) y lateral (b) de la misma donde se destacan las tres partes fundamentales que la caracterizan: Parte tensa, que está adherida por medio de un anillo fibrocartilaginoso unido al hueso temporal y que constituye la mayor área de la membrana. Parte flácida, que tiene forma triangular y es mucho más pequeña que la anterior y el Manubrio, el cual tiene la forma de una viga y su función es mantener tensa la MT.

Las diferentes partes de la membrana timpánica tienen sus propiedades mecánicas particulares. En nuestro análisis se ha considerado que el material de la MT es homogéneo, elástico y lineal con propiedades mecánicas mostradas en el Cuadro I, las cuales influyen significativamente en los modos normales de vibración de la MT. Las propiedades son: Módulo de Young, Módulo de Poisson, Densidad y Espesor de la MT cuyos valores han sido reportados por diversos autores¹³.

La función principal de la MT es convertir la onda mecánica sonora de presión que llega del oído externo en una onda mecánica que se pro-

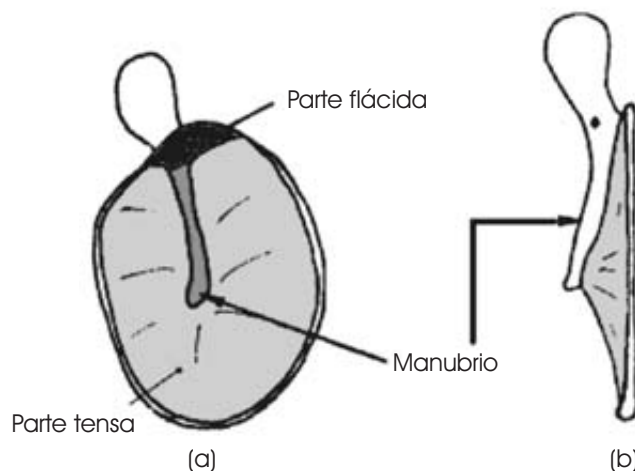


Figura 1. Vista frontal (a) y lateral (b) de la membrana timpánica.

Cuadro I. Propiedades mecánicas de la MT.

Propiedad mecánica	Parte tensa	Parte flácida	Manubrio
Espesor (mm)	0.04	0.1	—
Módulo de Young (Pa)	$(2.0-4.0) \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^{10}$
Densidad (kg/m^3)	1,000-1,200	1,200	1,200
Módulo de Poisson	0.3	0.3	0.3
Área transversal (m^2)	—	—	$20.0 \cdot 10^{-9}$

paga en un sólido (cadena oscicular) para llevar esta información al oído interno y de éste al cerebro, es por esta razón que la MT se encuentra unida al martillo.

2.2 DIGITALIZACIÓN Y MODELO GEOMÉTRICO DE LA MT

Como objeto bajo estudio se usó la membrana timpánica de un cadáver humano que es mostrada en la Figura 2, donde fue removida toda la cadena oscicular. Esta MT fue digitalizada en tres dimensiones (3D) mediante una máquina de medición por coordenadas MMC de marca Mitutoyo modelo BN-V504, que utiliza un palpador corto esférico de 0.5 mm de diámetro en bola que permite tocar un punto en el objeto y así conocer sus coordenadas (x, y, z). La resolución de la MMC es de 0.0005 mm, aproximadamente.

Para reproducir la compleja estructura de la MT, un total de 400 puntos fueron palpados en la misma. Los puntos fueron tomados con un espaciamiento uniforme de 0.0225 mm y mediante el software asociado a MMC se pueden obtener sus coordenadas las cuales son almacenadas en un archivo de texto. Los puntos permiten dibujar los contornos de la MT mediante un programa para dibujo mecánico, CAD Mechanical Desktop. Luego, la MT dibujada en forma de contorno es introducida en el programa de modelación para análisis numérico ANSYS versión 10.0 (ver Ref. 12) en el cual se esta-



Figura 2. Membrana timpánica humana usada como objeto de estudio.

blece su modelo geométrico con aspecto de volumen sólido.

En el análisis presentado se usaron tres modelos que consideran que la MT cumple con la ley de Hooke, que implica que se tiene un comportamiento lineal en cuanto a la elasticidad de la misma. Los modelos son:

Modelo isotrópico sin restricción: Este modelo consiste en considerar las mismas propiedades mecánicas en las partes tensa y flácida; mientras que en el manubrio que al tratarse de un material semejante a un cartilago se modeló con propiedades diferentes; sin embargo en cada parte fueron mantenidas las propiedades impuestas.

Modelo isotrópico con restricción: Éste consiste en colocar una restricción en el modelo anterior debido a la presencia del martillo; o sea, en la zona donde la MT está sujeta al martillo se coloca una condición de restricción que imposibilita a la MT oscilar libremente.

Modelo ortotrópico: Cuando este modelo es usado, la parte tensa es considerada como un cuerpo uniforme donde las propiedades mecánicas varían en direcciones ortogonales (radial y tangencial). Aquí la parte flácida y el manubrio fueron considerados isotrópicos; aunque con propiedades mecánicas diferentes entre sí. También este modelo tiene implícito la restricción debida a la presencia del martillo.

Debido a que la MT está unida en sus bordes al hueso temporal, fue necesario incorporar unas condiciones de restricción para modelar esta unión. Estas restricciones consisten en poner un empotramiento que restringe los grados de libertad de traslación y de rotación de todos los nodos asociados a los elementos en estas zonas. Por otro lado, la restricción debida a la presencia del martillo se realizó colocando elementos vigas unidos por un extremo a puntos del manubrio; mientras que en el otro extremo estos elementos se unieron a un punto fijo fuera de la MT.

En la Figura 3, se muestran los tres modelos geométricos propuestos (a y b) que se corresponden con el caso isotrópico sin y con restricción de martillo, respectivamente; mientras que (c) se corresponde con el ortotrópico. Observe que en el caso isotrópico, se destacan tres zonas de diferentes propiedades mecánicas; mientras que en el caso ortotrópico la parte tensa de MT tiene simetría radial y a cada una de estas zonas se le asignaron propiedades mecánicas diferentes.

2.3 MALLADO DE LA GEOMETRÍA

El programa de MEF ANSYS permite incorporar al objeto un elemento de malla a analizar, la selección de este elemento es muy importante, ya que del mismo depende la exactitud en la solución del problema y por supuesto el tiempo de procesamiento. Para crear la malla, primeramente se realiza enmallado de las áreas con un elemento de control (MESH200) propio del programa, el cual tiene la peculiaridad de no influir en la solución del problema; sin embargo, el mismo resulta útil para controlar el proceso de mallado de las superficies. Seguidamente, se utilizan elementos con características similares al objeto analizado, los cuales permiten asignar valores a las propiedades mecánicas en el modelo, estas características las reúnen los elementos placa (Shell63) y viga (BEAM4). Así el mallado se llevó a cabo de la siguiente forma, para las partes tensa y flácida se usó el elemento placa; mientras que para el manubrio el elemento viga.

En el modelo isotrópico, la cantidad total (placas y vigas) de elementos usados fue de 9,750 elementos, que se corresponde a un total de 3,217 nodos. Esta cantidad de nodos aumenta el número, los grados de libertad del modelo con el objetivo de dar una mejor representación del análisis modal. Para el modelo ortotrópico se tomaron un total de 16,850 elementos, con un total de 6,734 nodos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidos los modelos establecidos de trabajo cada uno fue procesado para obtener los modos normales de vibración y realizar una propagación de errores debido a las restricciones impuestas y al cambio de las propiedades mecánicas.

3.1 MODELO ISOTRÓPICO SIN RESTRICCIÓN DE MARTILLO

Las propiedades mecánicas usadas en este modelo fueron: Módulo de Young $E = 2.0 \cdot 10^7$ Pa, en las partes tensa y flácida de la MT y de $2 \cdot 10^{10}$ Pa para el manubrio; el módulo de Poisson fue escogido del mismo valor de 0.3 en cada una de las partes. La densidad para el manubrio y la parte flácida fue de $1,200 \text{ kg/m}^3$ y para la parte tensa de $1,000 \text{ kg/m}^3$. El espesor seleccionado fue de 0.04 mm y 0.1 mm para las partes tensa y flácida, respectivamente; mientras que el área de la sección transversal del manubrio fue tomada de un valor de $20 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

Bajo las condiciones impuestas de propiedades mecánicas y de restricción un total de 271 modos normales de vibración fueron obtenidos en el intervalo de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. El Cuadro II muestra los diez primeros modos cuando la membrana timpánica fue considerada isotrópica y no se tiene en cuenta las restricciones debidas a la presencia del martillo.

Una representación en forma de imagen (mapa de contorno) de los cuatro primeros modos normales de vibración obtenidos se muestra en la Figura 4, donde en (a) se representa el primer modo, mientras que (b-d) representan los modos 2, 3 y 4, respectivamente. Los valores mostrados en la figura representan valores normalizados y pueden ser calculados a través de una barra de color correspondiente a cada gráfica.

La MT se desplaza tanto por encima como por debajo de una referencia (plano en reposo de la MT) y en dependencia del modo normal de vibración es el valor del desplazamiento de las diferentes partes de la misma. Con colores calientes (amarillo y rojo) son representados los desplazamientos por encima de la referencia, siendo el color rojo quien indica los mayores desplazamientos.



Figura 3. Modelos geométricos de la membrana timpánica. En (a) modelo isotrópico sin restricción de martillo; mientras que (b) y (c) son los modelos isotrópicos con restricción de martillo y ortotrópico, respectivamente.

Cuadro II. Primeros 10 modos normales de vibración y sus frecuencias naturales para el modelo isotrópico sin restricción.

Modo normal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencia (Hz)	1,376.3	1,423.8	1,776.1	1,884.7	2,016.5	2,122.6	2,192.8	2,244.1	2,298.0	2,460.8

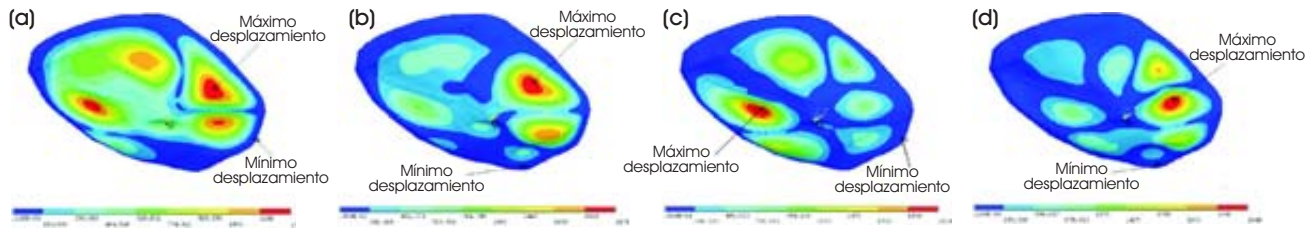


Figura 4. Modos normales de vibración para el modelo isotrópico de la MT sin restricción de martillo. En (a) se representa al primer modo; mientras que (b), (c) y (d) representan a los modos segundo, tercero y cuarto.

tos; mientras que con colores más fríos (azul intenso y cielo) representan donde la MT ha sufrido grandes desplazamientos por debajo de la referencia. En cada imagen se ha destacado los valores máximo y mínimo.

Un detalle a destacar es que tanto la parte flácida y los bordes unidos al hueso temporal son los que menos se desplazan en la MT, ya que la rigidez de esos puntos es mayor. Debido a la misma razón anterior, en la parte flácida es más propensa a que se establezcan los modos de más bajas frecuencias.

Por otro lado, la parte tensa es la que tiene mayor influencia en el proceso de conversión de las ondas sonoras, debido a su menor densidad y espesor, la misma puede oscilar con mayores amplitudes. Por su parte, en la misma se establecen los modos normales de vibración comenzando en el primer armónico de frecuencia 1376.3 Hz. Finalmente, el manubrio también puede entrar en resonancia para determinadas frecuencias y establecer modos de vibración en la MT.

3.2 MODELO ISOTRÓPICO CON RESTRICCIÓN DE MARTILLO

Para analizar los modos normales de vibración en este modelo se tuvieron en cuenta las mismas propiedades mecánicas que en el caso anterior. En el Cuadro III se muestran las frecuencias de los primeros diez modos normales de vibración obtenidos cuando al modelo se adiciona la condición de restricción debida a la unión del manubrio y el martillo. El total de modos normales obtenidos fue de 265

cuando fueron utilizados 3,557 elementos con 10,069 nodos.

En la Figura 5 se muestran los 4 primeros modos normales de vibración; en (a) se representa el primer modo, mientras que (b-d) representan los modos 2, 3 y 4, respectivamente. Los resultados indican una variación de las frecuencias de los mismos debida a la presencia de la restricción de martillo impuesta, ya que al aumentar la rigidez en el manubrio aparecen modos de más alta frecuencia en la MT. Calculando una cota de error relativo al comparar ambos modelos se observa que se comete un error del 3% al no tenerse en cuenta la presencia del martillo. Este error fue calculado utilizando las frecuencias medias de ambos modelos isotrópicos (con y sin restricción).

3.3 MODELO ORTOTRÓPICO

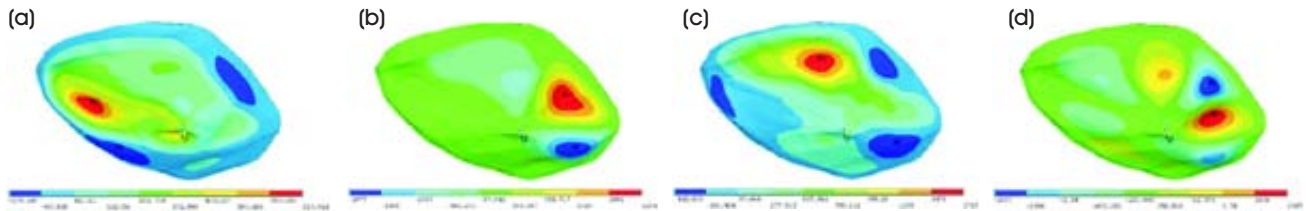
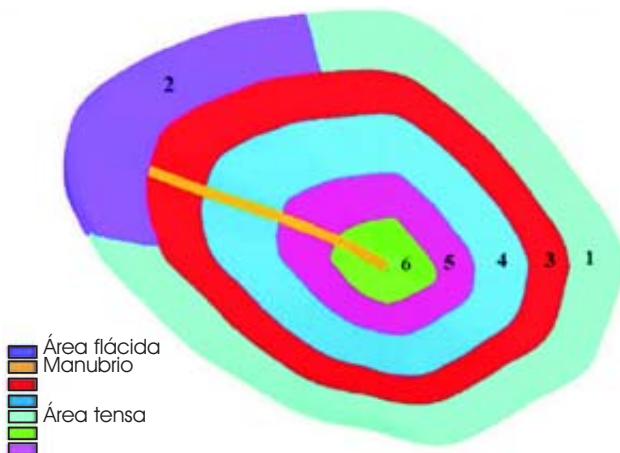
En este modelo las propiedades mecánicas que varían en forma radial y tangencial. Para realizar este modelo, primeramente se dividió la MT en varias zonas como se indica en la Figura 6 y a cada una de ellas se le asignó propiedades mecánicas diferentes. Estas propiedades se muestran en el Cuadro IV, ver Ref. 14.

En este modelo se usaron un total de 14,790 nodos que se corresponde a 5,007 elementos. Bajo estas condiciones la cantidad de modos normales obtenidos en el intervalo de frecuencias considerado fueron de 262. En el Cuadro V se muestran los diez primeros modos normales de vibración.

Una representación en forma de imagen de los 4 primeros modos normales de vibración se muestra en la Figura 7; donde en (a) se representa el

Cuadro III. Primeros 10 modos normales de vibración y sus frecuencias naturales para el modelo isotrópico con restricción.

Modo normal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencia (Hz)	1,453.4	1,502.3	1,942.8	2,036.0	2,126.2	2,221.1	2,286.5	2,370.2	2,425.2	2,612.3

**Figura 5.** Modos normales de vibración para el modelo isotrópico de la MT con restricción de martillo. En (a) se representa al primer modo; mientras que (b), (c) y (d) representan a los modos segundo, tercero y cuarto.**Figura 6.** Subdivisión por zonas de la membrana timpánica en el modelo ortotrópico.

primer modo, mientras que (b-d) representan los modos 2, 3 y 4, respectivamente. Los resultados obtenidos indican un incremento de las frecuencias de los modos normales de vibración debida al cambio de las propiedades mecánicas en dirección radial y por consecuencia se incrementa la rigidez. Al igual que el caso anterior, una cota de error relativo fue calculada para comparar el modelo isotrópico con restricción con el ortotrópico. El valor de esta cota fue de $\varepsilon_r \approx 12.9\%$, lo cual implica que el hecho de no considerar que las propiedades mecánicas varían en dirección radial imponen una mayor cota de error en el modelo a usar de membrana timpánica.

Los valores obtenidos en cada modelo fueron ajustados usando el método de los mínimos cuadrados obteniéndose tres curvas de frecuencias versus modos normales de vibración de cada mo-

delo. Estas curvas son mostradas en la Figura 8, donde se puede observar que las curvas correspondientes al modelo isotrópico sin y con restricción tienen pendientes muy parecidas y se concluye que la presencia de la restricción debida al martillo sólo incrementa el valor de la frecuencia por modo normal de vibración, la curva permanece con la misma pendiente. Sin embargo, en el modelo ortotrópico la curva cambia de pendiente y por consiguiente la frecuencia en los modos superiores varía considerablemente.

Por otro lado, en este modelo no fue considerado el canal auditivo, el cual constituye una cavidad resonante para determinadas frecuencias, tal y como reportan en su artículo Vallejo et al.¹⁵, los cuales determinaron una frecuencia de 1,300 Hz para el primer armónico considerando el caso ortotrópico; sin embargo, ellos no pueden garantizar una onda de presión de amplitud constante aplicada a la membrana timpánica.

4. CONCLUSIONES

Un análisis de tres modelos de la membrana timpánica mediante el método de elemento finito fue presentado. Los resultados obtenidos muestran a los modos normales de vibración de la MT para tres modelos escogidos que son: isotrópico sin y con restricción y ortotrópico. Estos modelos son comúnmente utilizados por diferentes autores^{7,16} para hacer el estudio modal y dinámico de la membrana timpánica. Es por esta razón que una primera importancia de este trabajo es que él mismo calcula el error cometido cuando no es considerado el contacto físico entre el martillo y el manubrio, el cual es de aproximadamente el 3% de error relati-

Cuadro IV. Propiedades mecánicas del modelo ortotrópico.

		Parte tensa		
		Módulo de Young (N/m ²)	Módulo de Poisson	Densidad (kg/m ³)
1	Ec	4x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	2x10 ⁷		
3	Ec	3.33x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	2.66x10 ⁷		
4	Ec	2.66x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	3.33x10 ⁷		
5	Ec	2x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	4x10 ⁷		
6	Ec	4x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	4x10 ⁷		
		Parte flácida		
2	Ec	1x10 ⁷	0.3	1,200
	Er	1x10 ⁷		
		Manubrio		
	E	2x10 ⁷	0.3	1,200

Cuadro V. Primeros 10 modos normales de vibración y sus frecuencias naturales para el modelo ortotrópico.

Modo normal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencia (Hz)	1,516	1,895	1,990	2,274	2,410	2,605	2,672	2,747	2,899	3,093

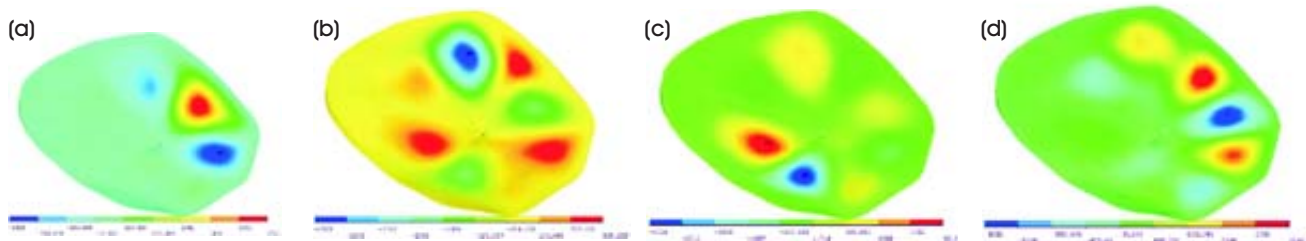


Figura 7. Modos normales de vibración para el modelo ortotrópico de la MT. En (a) se representa al primer modo; mientras que (b), (c) y (d) representan a los modos segundo, tercero y cuarto.

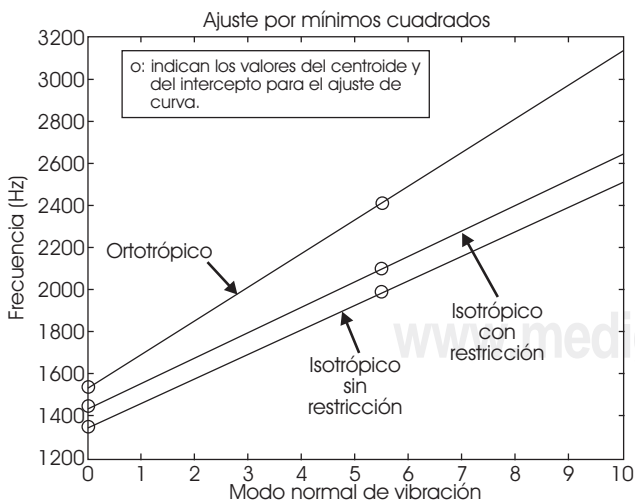


Figura 8. Ajuste por mínimos cuadrados de los datos obtenidos para cada uno de los modelos.

vo. Este error influye en el aumento de la frecuencia de los modos normales de vibración en el caso en que la restricción debida a la presencia del martillo sea considerada. Por otro lado, es posible analizar y calcular el error que se comete cuando se tiene en cuenta el cambio de las propiedades mecánicas en forma ortotrópica en la MT, cuyo error relativo fue de alrededor del 13%. Como se comprobó, la no consideración del cambio de las propiedades mecánicas en forma ortotrópica influye significativamente más en el cálculo de la frecuencia del modo de vibración obtenido.

Otros factores no han sido considerados en el modelo propuesto como la variación multicapa de la membrana timpánica, lo cual hace cambiar la forma en que oscila la MT y en este caso el modelo cambiaría a placa gruesa. Por otro lado, no se han considerado también otros factores que pueden

influir significativamente en el cálculo de las frecuencias de los modos normales en la MT. Entre estos factores se tiene al canal auditivo externo, el cual debido a su geometría cilíndrica actúa como un filtro permitiendo o no el paso hacia el oído medio de las ondas acústicas. El factor de humedecimiento de la membrana timpánica es otro factor que también tiene un papel importante en el cálculo de los modos que en la misma se establecen, ya que éste permite mejorar la elasticidad de la misma, lo cual depende realmente de la edad del individuo, sexo, de las condiciones atmosféricas del lugar, etc.

Finalmente se concluye que los factores de restricción debido al martillo y del cambio de las propiedades mecánicas juegan un papel importante para establecer un modelo más adecuado de la membrana timpánica, en especial de estos factores el que más influye es el cambio de las propiedades mecánicas en diferentes direcciones. Es por esta razón que el diseño y construcción de dispositivos artificiales que permitan sustituir las funciones de partes del oído medio en particular la MT debe tener en cuenta los factores analizados en este trabajo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica (FIMEE) de la Universidad de Guanajuato por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo. También se le agradece al Profesor Joris Dirckx de la Universidad de Amberes por sus valiosos comentarios. El primer autor agradece el apoyo otorgado mediante el proyecto de la Secretaría de Educación Pública (SEP) PROMEP/103.5/04/1335. HRB agradece los apoyos otorgados para realizar sus estudios de maestría dados por CONACYT y CONCYTEG.

BIBLIOGRAFÍA

- Mach E, Kessel J. Beitrage zur Topography und Mechanik des Mittelohres. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien (Math.- Phys. K1.) 1874; Abt. 3(69): 221-243.
- Helmholtz H. The mechanism if the ossicles of the ear and tympanic membrane. Pflugers Arch Physiol (Bonn) 1868; 1: 1-60.
- Dahmann H. Zur Physiologie des Horens; experimentelle Untersuchungen uber die Mechanik der Gehor-nochelchenkette, sowie uber deren Verhalten auf ton und Luftdruck, teil I. Z. Hals Nas Ohrenheilk 1929; 24: 462-498.
- Von Békesy G. On the measurement of the amplitude of vibration of the ossicles with a capacitive probe. Akustische Zeitschrift 1941; 6: 1-16.
- Tonndorf J, Khanna SM, Tympanic membrane vibrations in human cadaver ears studied by time averaged holography. Journal of Acoustical Society of America 1972; 52: 1221-1233.
- Willemin JK, Dandliker R, Khanna SM. Heterodyne interferometer for submicroscopic vibration measurements in the inner ear. J Acoust Soc Am 1988; 83: 787-795.
- Decraemer WF, Maes MA, Vanhuyse VJ. An elastic stress-strain relation for soft biological tissues based on a structural model. Journal of Biomechanics 1980; 13: 463-468.
- Zwislocki JJ. Analysis of the middle-ear function. Part I: Input impedance. J Acoust Soc Am 1962; 34 (8, Pt 2); 1514-1523.
- Matthews JW. Modeling reverse middle ear transmission of acoustic distortion signals (Delft U. P., The Netherlands), 1983: 11-18.
- Shaw EAG, Stinson MR. "Network concepts and energy flow in the human middle ear". J Acoust Soc Am 1981; 69: S44.
- Shaw EAG, Stinson MR. The human External and Middle Ear: Models and Concepts (Delft, The Netherlands), 1983: 3-10.
- Faya J, Puriaa S, Willem F. Decraemer, Charles Steelea, three approaches for estimating the elastic modulus of the tympanic membrane. Journal of Biomechanics 2005; 38: 1807-1815.
- Gaihede M, Liao D, Gregersen H. *In vivo* areal modulus of elasticity estimation of the human tympanic membrane system: modelling of middle ear mechanical function in normal young and aged ears, Phys Med Biol 2007; 52: 803-814.
- Ferris P, Prendergast PJ. Middle-ear dynamics before and after ossicular replacement. Journal of Biomechanics 2000; 33: 581-590.
- Ross CTF. Finite element. Methods in Engineering Science, Ellis Harwood, England (1990). P. Ferris, P.J. Prendergast, Middle-ear dynamics before and after ossicular replacement. Journal of Biomechanics 2000; 33: 581-590.
- Vallejo LA, Delgado VM, Hidalgo A, Gil-Carcedo E, Gil-Carcedo LM, Montoya F. Modelado de la geometría del conducto auditivo externo mediante el método de los elementos finitos, Acta Otorrinolaringología Esp 2006; 57: 82-89.