



Modelos dinámicos isotrópico y ortotrópico de la membrana timpánica

R. A. Martínez-Celorio*
H. Rodríguez-Bravo**
R. A. Rodríguez Cruz*
L. Martí-López***
R. Castro-Sánchez*
F. Ireta Moreno*
D. Hernández Fusilier*
A. Vega Corona*
R. González Peña****

* Dirección de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca, UGTO.

** ITESI.

*** Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear. Ciudad de La Habana, Cuba.

**** Unidad Biofísica y Física Médica, Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, Universidad de Valencia, España.

Correspondencia:

R. A. Martínez-Celorio
Carretera Salamanca-Valle de Stgo. km 3.5+1.5, Salamanca, Gto, México, 36885.
Tel. +52 464 64 79940.

Artículo recibido: 10/octubre/2009

Artículo aceptado: 20/marzo/2010

Este artículo también puede ser consultado en versión completa en: <http://www.medigraphic.com/ingenieriabiomedica/>

RESUMEN

En este artículo, se estudian los modelos isotrópico (con y sin martillo) y ortotrópico de la membrana timpánica (MT) mediante una modelación con el método de elementos finitos (MEF). La forma de la MT modelada se obtuvo digitalizando un tímpano humano colectado de un cadáver con un palpador «XYZ» en una máquina de coordenadas. El programa de MEF permite considerar las propiedades mecánicas que caracterizan a cada una de las partes de la MT, las condiciones de frontera que modelan el contacto de la misma con el hueso temporal y su unión con el martillo. Se establecen diferencias en el comportamiento en las modelaciones de los tres modelos. El presente trabajo intenta hacer una contribución al conocimiento de la MT con vistas a crear dispositivos que reproduzcan su funcionamiento.

Palabras clave: Membrana timpánica, análisis dinámico, método de elemento finito.

ABSTRACT

In this paper, the isotropic and orthotropic models of the tympanic membrane (with and without hammer bone) are studied. The method used in this paper is based on the finite element method. The tympanic membrane form was obtained by a digitalization of human tympani. This part of the ear was collected from a dead body. The process was performed with a XYZ «touching machine» interconnected to the so called coordinate machine. The finite element software may include the material properties that characterize each section of the tympanic membrane, the boundary conditions describing the contact between the tympanic membrane and the temporal bone as well as the hammer bone. In this study, it was established the behavioral differences between three different models. This work tries to contribute to tympanic membrane knowledge. The final idea behind this result is to design biomedical devices that can reproduce its performance.

Key words: Tympanic membrane, dynamic analysis, finite element method.

INTRODUCCIÓN

El sistema auditivo consta de tres partes (oído externo, medio e interno). Cada una tiene su función específica. El oído externo, por ejemplo, tiene la función principal de captar las ondas sonoras en el

aire y conducirla 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 osicular (martillo, yunque y estribo) hacia el oído interno, el cual convierte la onda en un estímulo nervioso que es

conducido al cerebro a través del nervio auditivo. El funcionamiento coordinado de cada una de las partes del oído hace que éste funcione como un transductor y permita la audición. Los primeros estudios de la MT fueron realizados por Mach y Kessel¹ en 1874, cuando observaron con una lupa la deformación de la MT bajo una presión estática. Por otro lado, Helmholtz² publicó su primera teoría acerca de la MT, donde propuso que ésta se encuentra formada básicamente por fibras. Un estudio de la rotación del martillo bajo presión estática fue hecho por Dahman³, quien midió ésta con un juego de espejos situados en el canal auditivo. En la misma dirección, Von Bekesy⁴ aplicando mecánica teórica dedujo que la MT vibra como una placa rígida. Las técnicas ópticas han sido también aplicadas en mediciones de la MT, por ejemplo, Tonndorf et al.⁵ usaron los métodos de Interferometría Holográfica para comprobar la curvatura de la MT propuesta por Helmholtz, refutando el trabajo de Von Bekesy. En la actualidad, nuevas técnicas permiten medir vibraciones nanométricas de la MT en frecuencias superiores a 5 KHz. Por ejemplo, Willemin et al.⁶ midieron amplitudes de vibración de 1 nm usando un interferómetro heterodino y Decraemer et al.⁷, usando un interferómetro heterodino midieron pequeñas vibraciones en celdas individuales receptoras en la cóclea.

Por otro lado, muchos autores han construido modelos matemáticos para explicar el funcionamiento de la MT. Entre ellos podemos mencionar los modelos desarrollados por Zwislocki⁸, Matthews⁹ y por Shaw^{10,11}, quienes usaron MEF en modelos geométricos de la MT para obtener interesantes resultados de varios parámetros de interés como la impedancia acústica y la distorsión. Con el objetivo de comprender mejor el funcionamiento de la MT y poder diseñar mejores prótesis, los científicos han tratado constantemente de mejorar los modelos físicos y matemáticos. Una de las vías para ello ha sido introducir datos realistas de las propiedades mecánicas de la MT. Por ejemplo, Fay et al.¹², utilizaron el valor del módulo de elasticidad del colágeno en sus modelaciones, mientras que Gaihede et al.¹³, incorporaron a su modelo el valor del módulo de elasticidad de la MT medido en ejemplares jóvenes y mayores.

Previamente a este trabajo, Martínez-Celorio et al.¹⁴, realizaron un análisis de los modos normales de vibración mediante el MEF y utilizando modelos isotrópicos y ortotrópicos para la MT del oído humano con el objetivo de tener una valoración de la influencia de algunas condi-

ciones de contorno que presentan los mismos. En este trabajo, se continúa el estudio de la MT presentando un estudio de la respuesta dinámica mediante MEF de tres modelos comúnmente usados para el estudio de la membrana timpánica. Los tres modelos bajo estudio son: isotrópico sin y con restricción de martillo y un modelo ortotrópico con restricción. El estudio es importante, pues amplía el conocimiento acerca del funcionamiento de la membrana timpánica para la construcción de dispositivos que permitan reproducir su funcionamiento. Este estudio permite también constatar la influencia que tiene para la membrana timpánica el aumento de su rigidez; así como la variación de sus propiedades mecánicas en diferentes direcciones. El trabajo ha sido estructurado en cuatro secciones. En la sección 2, se presenta una breve descripción 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.

DETALLES DEL MODELO

La generación de sensaciones auditivas en el ser humano es un proceso que se desarrolla en tres etapas, las cuales 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, en la etapa de procesamiento se lleva a cabo completamente en el cerebro y es 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.

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 aproximados¹² de 1 cm 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 unida por sus bordes al hueso temporal por medio de un anillo cartilaginoso y que constituye la mayor parte de la MT; 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 cuya disposición geométrica mantiene tensa la MT.

En el análisis presentado, se ha considerado que el material de la MT es homogéneo, elástico y lineal con propiedades mecánicas mostradas en el Cuadro 1, las cuales influyen significativamente en el comportamiento dinámico de la MT. Las propiedades son: módulo de Young, módulo de Poisson, densidad y espesor, 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 propaga en un sólido (cadena osicular) para llevar esta información al oído interno y de éste al cerebro, es por esta razón que la MT se encuentra unida al martillo.

Digitalización y modelo geométrico de la MT

Como objeto bajo estudio se usó la membrana timpánica de un cadáver humano de la que fue removida toda la cadena osicular. 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 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 estructura de la MT, un total de 400 puntos fueron palpados en la misma. Los puntos fueron tomados con un espaciado uniforme de 0.0225 mm y mediante el software asociado a MMC se pueden obtener sus coord-

nadas, las cuales son almacenadas en un archivo de texto. El programa de dibujo mecánico CAD Mechanical Desktop fue empleado para dibujar el contorno de la MT a partir de las coordenadas obtenidas de los puntos. El contorno de la MT así obtenido se introduce al programa de MEF ANSYS versión 10.0 y se escoge el modelo geométrico que la describirá. Esta última operación consiste en representar la MT mediante elementos virtuales propios del programa, tales como placas, vigas, etc. Los modelos usados son:

Modelo isotrópico sin martillo: Este modelo consiste en desprestigiar el efecto de la unión del extremo del martillo a la MT y considerar las mismas propiedades mecánicas en las partes tensa y flácida, mientras que el manubrio se considera con propiedades mecánicas diferentes.

Modelo isotrópico con martillo: Consiste en colocar elementos vigas que consideren la ligadura entre la MT y el 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. Este modelo tiene implícita la presencia del martillo.

En todos los modelos se supone que la MT cumple con la ley de Hooke, o lo que es lo mismo, que es perfectamente elástica.

Debido a que la MT está unida en sus bordes al hueso temporal, también fue necesario incorporar condiciones de frontera para modelar esta unión. Estas condiciones consisten en poner un empotramiento que restringe los grados de libertad de traslación y de rotación de todos los nodos situados en las zonas fronterizas. Para modelar la ligadura debida a la presencia del martillo se utilizaron elementos vigas unidos por un extremo

Cuadro 1. Propiedades mecánicas de la MT.

Propiedad mecánica	Parte tensa	Parte flácida	Manubrio
Espesor (mm)	0.04	0.1	—
Módulo de Young (Pa)	$(2.0-4.0) \times 10^7$	1.0×10^7	2.0×10^{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)	—	—	20.0×10^{-9}

a puntos en el manubrio; mientras que en el otro extremo estos elementos se unieron a un punto fijo fuera de la MT.

En la Figura 2, se muestran los tres modelos propuestos, (a) y (b) corresponden al caso isotrópico sin y con restricción de martillo, respectivamente; mientras que (c) corresponde con el ortotrópico. Obsérvese 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.

Mallado de la geometría

El programa ANSYS^{15,16} divide el objeto simulado en pequeños volúmenes, mediante una malla tridimensional. Mientras más fina es la trama de esta malla, mayor es la precisión de la solución del problema y mayor es el tiempo de cálculo. 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 embar-

go, 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.

La cantidad de elementos usados depende del tipo de modelo escogido, en el caso del 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 de grados de libertad del modelo con el objetivo de dar una mejor representación de la amplitud de las oscilaciones. Para el modelo ortotrópico se tomaron un total de 16,850 elementos, con un total de 6,734 nodos. Para calcular la respuesta dinámica se supuso que la MT era sometida a un estímulo forzado consistente en una presión sonora sinusoidal con amplitud de 0.2 N/m² (80dB), frecuencia en el intervalo audible (0.020-20) kHz y fase constante sobre la MT.

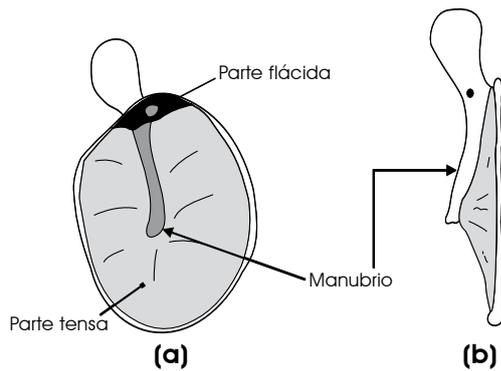


Figura 1. Vista frontal (a) y lateral (b) de la membrana timpánica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada uno de los modelos establecidos fue procesado mediante el programa ANSYS para analizar la respuesta dinámica en dependencia de los elementos añadidos, los cuales fueron: 1.) condiciones de frontera impuestas; 2.) ligadura martillo-MT; 3.) cambio de las propiedades mecánicas. Para mostrar los resultados se dividió la MT en tres partes fundamentales: parte flácida, manubrio y parte tensa. En las dos primeras se tomaron dos puntos; mientras que en la parte tensa fueron tomados tres puntos. Esto con el objetivo de comparar la respuesta de amplitud *versus* frecuencia



Figura 2. Modelos geométricos de la membrana timpánica. En (a) modelo isotrópico sin martillo; mientras que (b) y (c) son los modelos isotrópicos con martillo y ortotrópico, respectivamente.

entre los modelos. En la Figura 3, se muestra una MT sobre la cual se colocaron los puntos estudiados, donde se siguió el criterio de que los puntos estuviesen equiespaciados en las zonas flácida y manubrio; mientras que en la parte tensa se escogieron puntos ubicados a diferentes radios según el modelo ortotrópico como será analizado posteriormente.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los modelos utilizados.

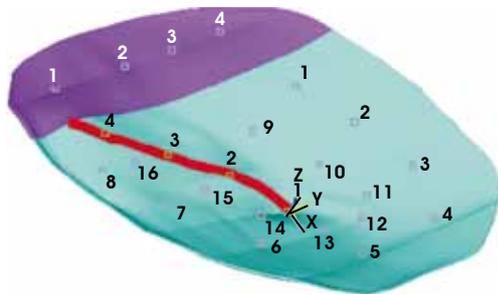


Figura 3. Puntos seleccionados en cada parte de la membrana timpánica.

Modelo isotrópico sin martillo

Las propiedades mecánicas¹⁷ usadas en este modelo fueron: módulo de Young $E = 2.0 \times 10^7$ Pa, en las partes tensa y flácida de la MT y de 2×10^{10} Pa en 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 $20 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Para obtener los resultados de la modelación por medio del programa ANSYS se consideró un total de 3,217 elementos entre vigas y placas.

En la Figura 4a, b se muestran los resultados de la modelación en ANSYS (amplitud de la oscilación versus frecuencia) de los dos puntos escogidos en la parte flácida de la MT. En la Figura 4a se grafica el resultado de la modelación del punto 1; mien-

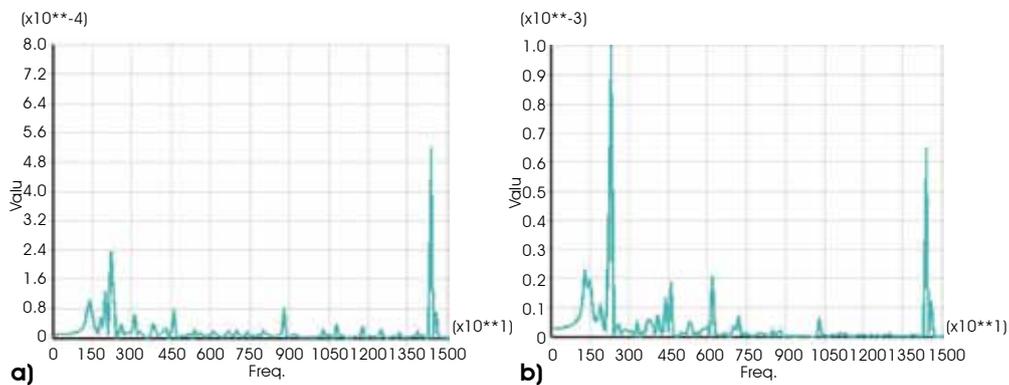


Figura 4. Respuesta dinámica de la parte flácida de la MT en el modelo isotrópico sin martillo. En (a) se representa al punto 1, según la figura 3 y en (b) al punto 3.

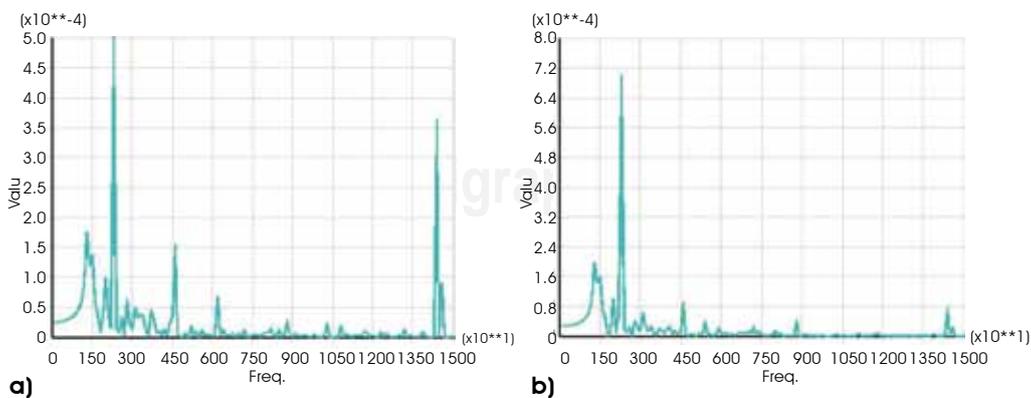


Figura 5. Respuesta dinámica del manubrio de la MT en el modelo isotrópico sin martillo. En (a) y (b) se representan los punto 1 y 3, respectivamente, según la figura 3.

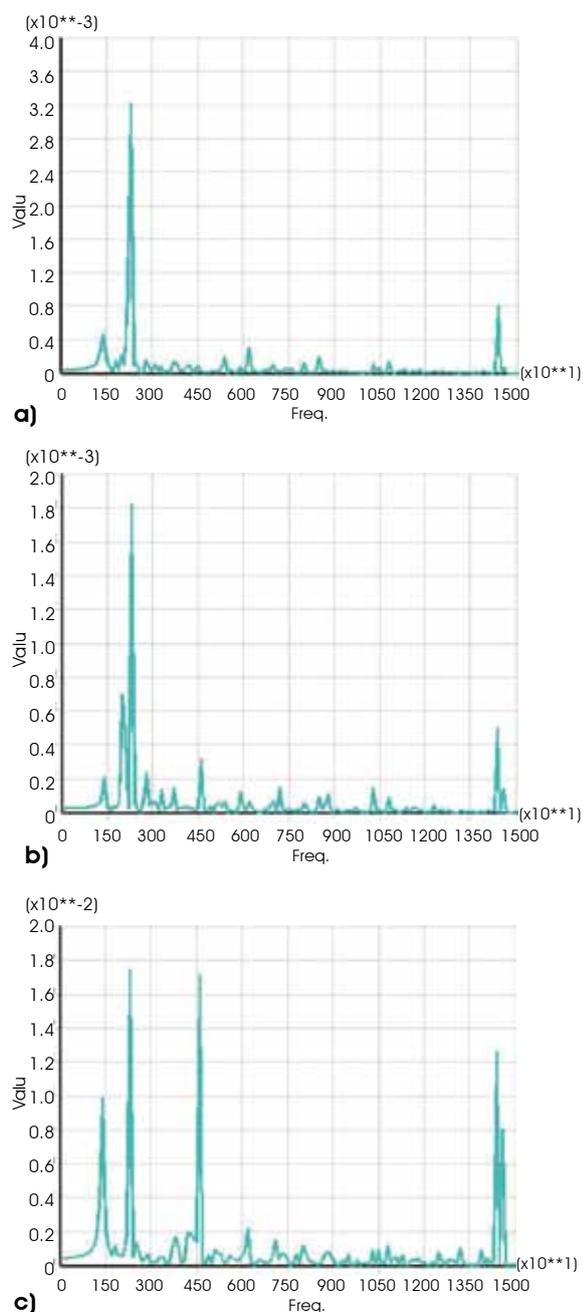


Figura 6. Respuesta dinámica de la parte tensa de la MT en el modelo isotrópico sin martillo. Se representan los puntos 1 (en a), 5 y 10 según la figura 3.

tras que en la Fig. 4b se muestra el resultado del punto 3. Como se muestra en ambas figuras, en éstas existen varios picos de amplitud que indican los valores de frecuencia donde la amplitud de las oscilaciones es máxima.

Se puede observar que los máximos de amplitud coinciden en su valor de frecuencia para todas las gráficas, aunque con diferentes rangos, ya que

dependen de las coordenadas donde fueron tomados. Comparando ambas gráficas, de la Figura 4, se puede detectar que el primer máximo ocurre en ambas gráficas al mismo valor de frecuencia de 1,376.3 Hz. Sin embargo, la amplitud de ambos son diferentes, para el primer gráfico la amplitud es de 1.6×10^{-4} mm y para el segundo es de 2.2×10^{-3} mm. Este resultado es lógico, ya que al estar el punto 1 más cerca del borde, la amplitud de sus oscilaciones está limitada, hay que recordar que el modelo no sobrepasa el límite de elasticidad. Por otro lado, las mismas conclusiones son obtenidas con los otros puntos marcados sobre la MT según Figura 3.

Los resultados de la modelación para los puntos ubicados sobre el manubrio están dados en la Figura 5a, b, en (a) se muestra la modelación del punto 1 (umbo) en el manubrio; mientras que en la Figura 5b, se muestra la modelación del punto 3 según la Figura 3. El manubrio fue modelado como una viga fijada por un extremo a la zona de intercepción de las partes flácida y tensa, mientras que por la otra está unida a la parte tensa.

Si comparamos los resultados obtenidos, las gráficas muestran la misma posición para los máximos e igualmente que en el caso anterior la amplitud de estos máximos son diferentes. Recordemos que debido a su disposición geométrica el manubrio mantiene estirada a la MT, es por esta situación que sus desplazamientos son pequeños, lo cual coincide con los resultados obtenidos y están en el orden de 10^{-4} mm de amplitud de oscilación. La Figura 6 (a-c) muestra los gráficos de tres puntos escogidos sobre la parte tensa de la MT. Los puntos escogidos para su presentación fueron 1, 5, 10, según la Figura 3, donde la gráfica de amplitud *versus* frecuencia para el punto 1 se muestra en (a); mientras que los restantes puntos son mostrados con las gráficas de (b) y (c), respectivamente. Estos puntos fueron escogidos para hacer una comparación con los demás modelos que serán estudiados.

En las Figuras 4-6 podemos constatar que la simulación predice amplitudes significativas en el intervalo de frecuencias entre 0 y 5 kHz, lo cual clasifica a este modelo apropiado para un estudio de bajas frecuencias. Como veremos en las siguientes secciones esta respuesta es diferente a la que se obtiene con modelos más realistas donde se toman en cuenta otros factores como la ligadura entre martillo y la MT o el cambio de propiedades mecánicas en dirección radial.

Modelo isotrópico con martillo

Este modelo fue construido en base al anterior pero incorporando la ligadura que existe entre la MT y el martillo. Esto permite determinar el efecto de la ligadura sobre la respuesta dinámica de la membrana timpánica. Para obtener los resultados de este modelo mediante MEF fueron usados un total de 3,557 elementos (viga y placas). Con el objetivo de hacer una comparación con el modelo anterior, las gráficas mostradas se corresponden a los mismos puntos escogidos.

La figura 7a, b muestra los gráficos de la modelación realizada sobre los puntos escogidos en la parte flácida. En (a) se grafican los resultados obtenidos en el punto 1; mientras que en Figura 7b muestra los análisis del punto 3.

Como se puede observar, en cada figura existen pocos picos de amplitud y el mayor valor fue obtenido para la frecuencia de 5,575 Hz. Por tanto, se puede concluir que la ligadura entre la MT y el

martillo influye de manera significativa en la respuesta en frecuencia del modelo. Así la presencia de esta ligadura en el modelo aumenta el valor de los picos de frecuencia, obteniéndose valores por encima de los 5 KHz como en el caso anterior. Por otra parte, en la Figura 8a, b, se muestran los resultados de las modelaciones de los puntos situados sobre el manubrio, en (a) se muestra el análisis del punto 1 (umbo) y en (b) la respuesta en frecuencia del punto 3.

Se puede observar que en las gráficas correspondientes al manubrio aparecen otras frecuencias por debajo de 5,000 Hz. Las gráficas de cuatro puntos correspondientes a la parte tensa se muestran en la Figura 9 (a-c).

El incorporar la ligadura entre martillo y MT en el modelo isotrópico no explica cualitativamente la respuesta en frecuencia; sin embargo, permite apreciar los efectos que provoca en el cálculo la ligadura. Un modelo más real de la MT se explica a continuación.

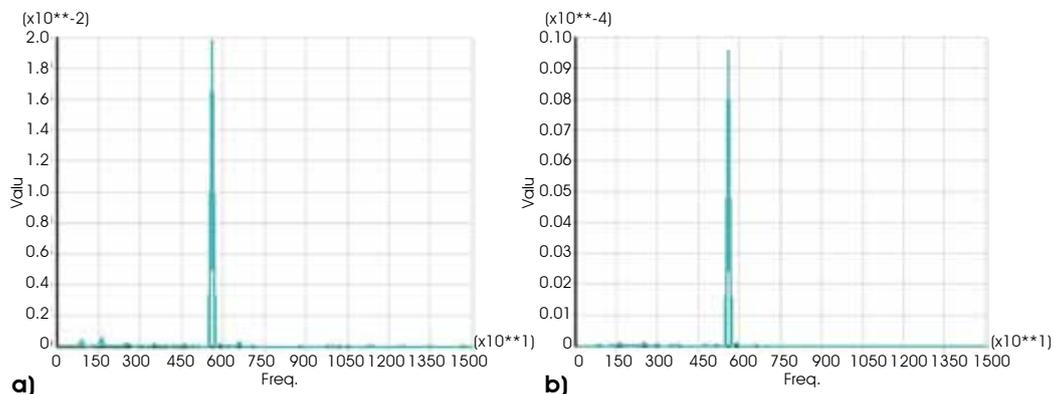


Figura 7. Respuesta dinámica de la parte flácida de la MT en el modelo isotrópico de la MT con martillo. En (a) y (b) se representan los puntos 1 y 3, respectivamente según la figura 3.

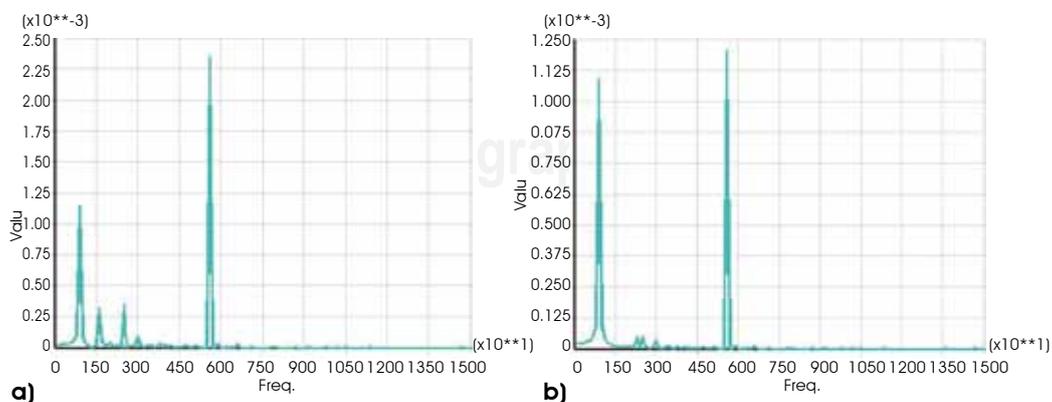


Figura 8. Respuesta dinámica del manubrio de la MT en el modelo isotrópico con martillo. En (a) y (b) se representan los puntos 1 y 3.

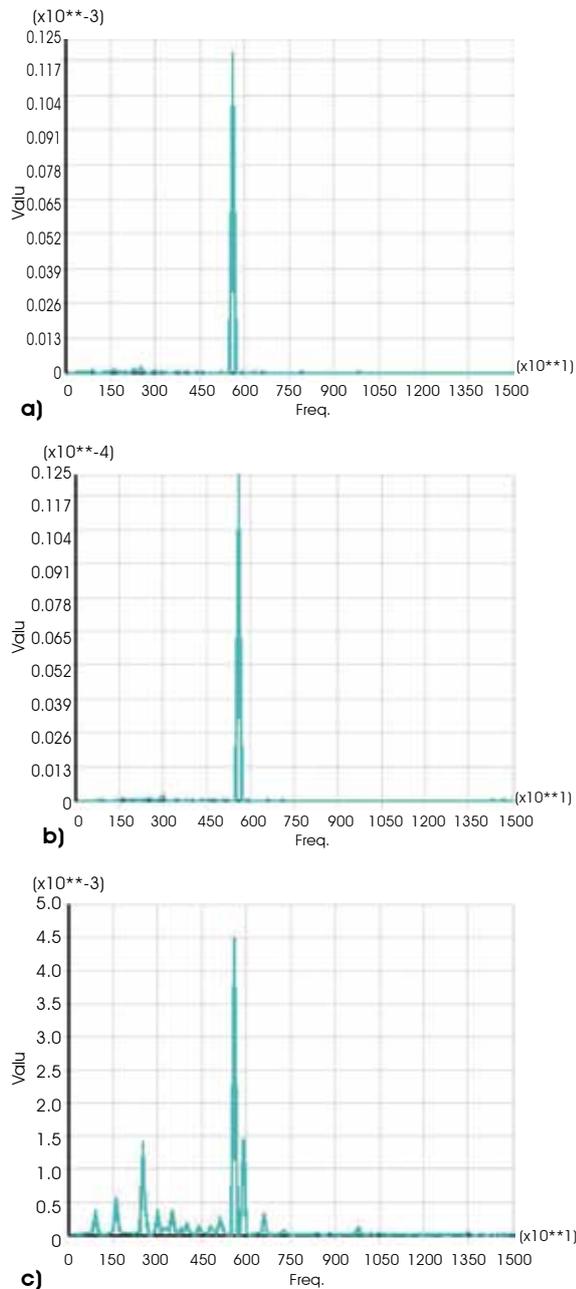


Figura 9. Respuesta dinámica de la parte tensa de la MT para el modelo isotrópico con martillo, las gráficas se refieren a los puntos 1, 5 y 10 según la figura 3.

Modelo ortotrópico

En este modelo las propiedades mecánicas se varían en forma radial y tangencial, por esta razón se usó la opción 9 del elemento placa (KEYOPTION 9) en el programa ANSYS, la cual permite trabajar a las propiedades en estas direcciones. Debido a la simetría en las propiedades mecánicas, se im-

plementó un sistema de coordenadas cilíndricas local que permite orientar a los elementos usados para resolver el modelo. La geometría usada en el modelo se indica en la Figura 10, donde a cada zona le fueron asignadas propiedades mecánicas diferentes, tal como se muestra en el Cuadro 2¹⁷.

Para realizar la modelación mediante MEF en este modelo se usaron un total de 14,790 nodos que se corresponde a 5,007 elementos (viga y placa). En la Figura 11a, b se muestran las gráficas obtenidas como resultado de la modelación mediante ANSYS de los puntos escogidos en la parte flácida de la MT. En (a) se grafica el análisis dinámico del punto 1; mientras que en la Figura 11b se muestra el análisis del punto 3.

A diferencia de los modelos anteriores, en éste los picos de amplitud no están situados en los mismos valores de frecuencias. Si comparamos ambas gráficas (a) y (b) podemos comprobar que el primer máximo para (a) ocurre en 2,573 Hz; mientras que para (b) existe un máximo de pequeña amplitud en 1,518 Hz. Este resultado se le atribuye a que las propiedades mecánicas en la dirección radial han sido variadas. Si observamos además la amplitud de las oscilaciones vemos que éstas son diferentes y están en concordancia con la posición de los puntos tal y como se había analizado en los modelos anteriores. Las gráficas correspondientes a la modelación de los puntos situados sobre el manubrio se presentan en la Figura 12a, b. En (a) se muestra la gráfica del punto 1 (umbo) en el manubrio; mientras que en (b) muestra el resultado de la modelación del punto 3.

Los resultados de la modelación en el manubrio muestran un amplio diapason dinámico en la respuesta del mismo. A diferencia de los modelos analizados anteriormente, en este modelo la respuesta en frecuencia va desde 1,528 Hz a 15 kHz, lo cual hace al modelo más cercano a la realidad. Se destaca igualmente que la respuesta de amplitud de las oscilaciones del manubrio en este modelo es menor que los modelos previamente analizados. Este resultado es lógico si se tiene en cuenta que la amplitud de las oscilaciones medidas de la membrana timpánica mediante otras técnicas están en el orden de 10-9-10-6 m. La respuesta en frecuencia derivada de la modelación de los puntos escogidos sobre la parte tensa es mostrada en la Figura 13 (a-c). En (a) se muestra la gráfica correspondiente al punto 1; mientras que en (b) y (c) se muestran los puntos 5 y 10. Se destaca un amplio intervalo dinámico en la respuesta de esta zona.

De los resultados obtenidos en este modelo se puede concluir que el mismo presenta un espectro más amplio de frecuencias que los anteriores; por consiguiente, es un modelo más real del funcionamiento de la MT. El modelo isotrópico sin martillo presenta un intervalo dinámico de trabajo entre

(0-5) kHz resultando un modelo apropiado para sistemas que trabajan en bajas frecuencias, tales como los canales telefónicos, los cuales presentan un ancho de banda de 4 kHz. Al tener en cuenta la ligadura entre la MT y el martillo (modelo isotrópico con martillo) la respuesta dinámica cambia, apareciendo un pico de intensidad para una sola frecuencia. Esto indica que los elementos vigas usados para modelar la ligadura del martillo permiten este valor de frecuencia. Las desventajas del modelo isotrópico son, en esencia, dos: (1) tiene pequeño ancho de banda, sólo 5 kHz y (2) no considera el cambio de las propiedades mecánicas en diferentes direcciones, lo que lo hace poco realista. Ambas desventajas son resueltas en el modelo ortotrópico en el cual se observa un intervalo dinámico más amplio. A pesar que este modelo describe mejor el funcionamiento de la MT, el mismo puede ser mejorado sustancialmente para hacerlo más realista. Para ello se pueden tener en cuenta factores como: (1) que la MT está cons-

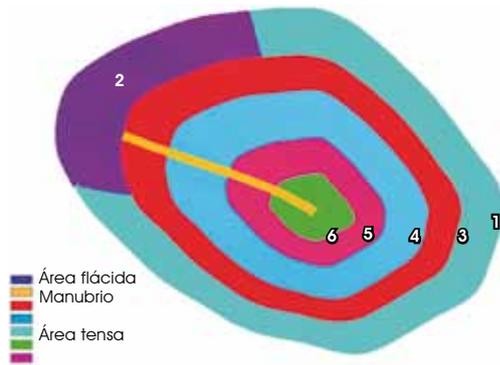


Figura 10. Subdivisión por zonas de la membrana timpánica en el modelo ortotrópico.

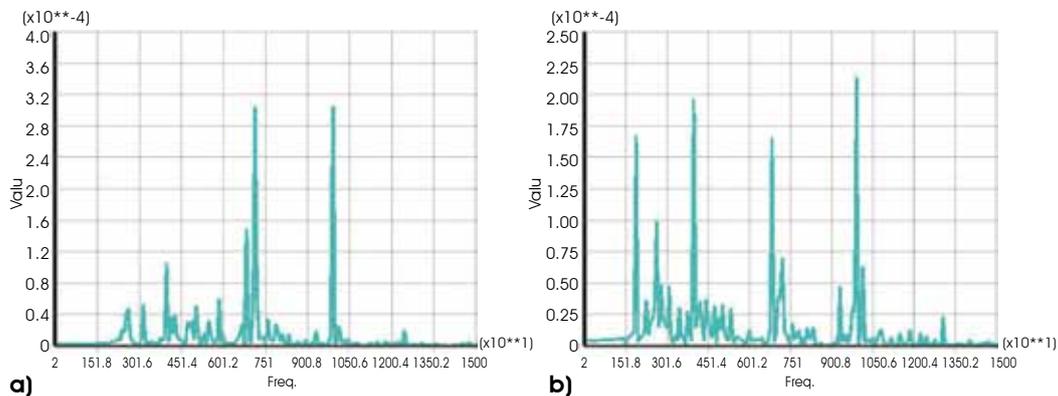


Figura 11. Respuesta dinámica de la parte flácida de la MT para el modelo ortotrópico. En (a) y (b) se representan los puntos 1 y 3, según la figura 3.

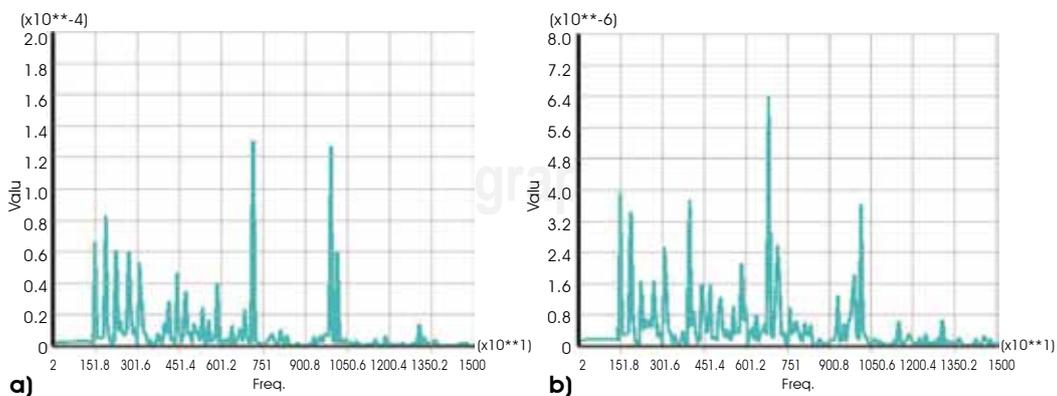


Figura 12. Respuesta dinámica del manubrio de la MT para el modelo ortotrópico. En (a) se representa al punto 1, según la figura 3; mientras que en (b) se representa al punto 3.

tituida por diferentes capas de espesor variable y en los cálculos se debería representar geométricamente como una placa gruesa, (2) el humedecimiento de la MT, pues se conoce que una de las causas de pérdida auditiva en los individuos es la resequedad de la MT, lo cual está vinculado a la edad y el sexo de los individuos, así como a las condiciones atmosféricas¹³ y (3) la conexión de la MT con el canal auditivo externo, pues el mismo actúa como un filtro que permite la propagación o no de determinadas frecuencias de la onda de presión. En esta dirección, Vallejo et al.¹⁸, determinaron la respuesta de amplitud en un modelado mediante ANSYS del canal auditivo externo.

CONCLUSIONES

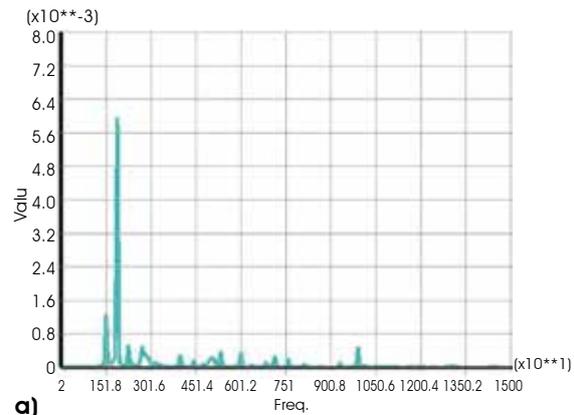
Un análisis dinámico mediante cálculos con diferencias finitas de la MT con tres modelos (isotrópico con y sin martillo y ortotrópico) fue presentado. Estos modelos son comúnmente utilizados por los diferentes autores^{7,17,18} para hacer el estudio modal y dinámico de la membrana timpánica. En nuestro trabajo hemos empleado una malla de diferencias finitas que se construyó a partir de una imagen digitalizada de una MT colectada de un cadáver. Esto representa una mejora respecto a

trabajos previos sobre el tema, pues la geometría es más realista.

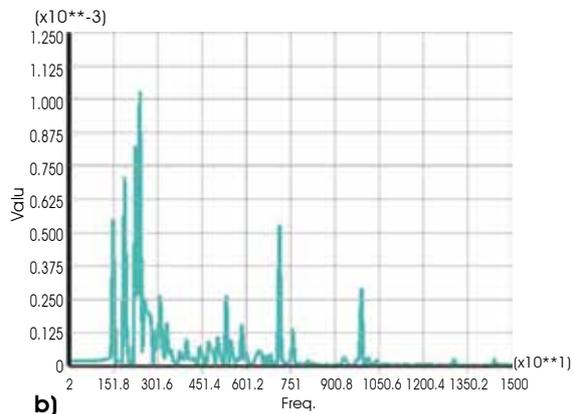
Los resultados obtenidos indican que factores como: condiciones de fronteras, ligaduras entre martillo y la MT, así como las propiedades mecánicas asignadas a las diferentes zonas de la MT influyen significativamente en la respuesta según el

Cuadro 2. Propiedades mecánicas del modelo ortotrópico.

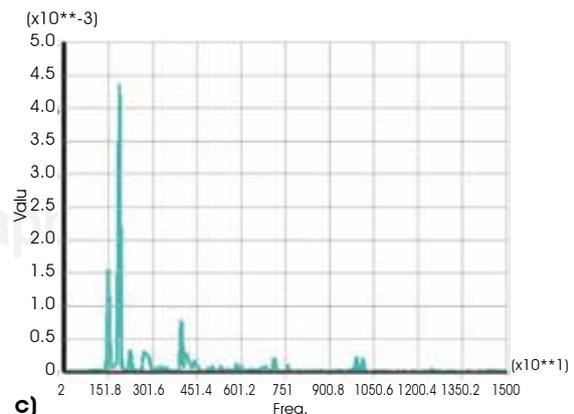
	Módulo de Young (N/m ²)	Parte tensa Módulo de Poisson	Densidad (kg/m ³)	
1	E _C	4 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	2 x 10 ⁷		
3	E _C	3.33 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	2.66 x 10 ⁷		
4	E _C	2.66 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	3.33 x 10 ⁷		
5	E _C	2 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	4 x 10 ⁷		
6	E _C	4 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	4 x 10 ⁷		
Parte flácida				
2	E _C	1 x 10 ⁷	0.3	1,200
	E _r	1 x 10 ⁷		
Manubrio				
	E	2 x 10 ⁷	0.3	1,200



a)



b)



c)

Figura 13. Respuesta dinámica de la parte tensa de la MT para el modelo ortotrópico. Se representan los puntos 1 en (a), 5 en (b) y 10 en (c) según la figura 3.

modelo. El factor que más influye en la respuesta es la variación de las propiedades mecánicas, por consiguiente es necesario tenerlo en cuenta en el diseño y construcción de dispositivos artificiales que sustituyan a la MT.

Los errores que más influyeron en el estudio de la respuesta dinámica de la MT se deben a: proceso de digitalización, este error se puede disminuir usando un palpador de mejor precisión o con otros tipos de escáner tales como, escáner láser o de RX. Ubicación de la MT en el canal auditivo, la cual comúnmente está inclinada formando un ángulo de 30° aproximadamente, esto provoca que exista un gradiente de presión en la dirección de la onda incidente sobre la MT; proceso de mallado, si se incrementa el número de elementos en el mallado aumenta la precisión sacrificando el tiempo de cómputo.

RECONOCIMIENTOS

RAMC agradece los apoyos obtenidos mediante proyecto de la Secretaría de Educación Pública (SEP) PROMEP/103.5/04/1335 y CONCyTEG 07-16-K662-061. HRB agradece los apoyos recibidos para realizar tesis de maestría por parte de CONACyT y CONCyTEG. Los autores desean agradecer a los árbitros del artículo por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- 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 of 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 Gehorknochenchenkette, 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, Vanhuysse 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 J W. 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.
- Fay J, Sunil Puriaa, 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. Donghua Liao and Hans Gregersen, *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.
- Martínez-Celorio RA, Rodríguez BH, Rodríguez CRA, Castro-Sánchez R, Martí-López L, Vega CA. Análisis de modos normales de vibración en los modelos isotrópico y ortotrópico de la membrana timpánica, RMIB 2007; XXVIII(2): 83-91.
- Ansys®. "Release Notes", Ansys INC., 2006.
- Ross CTF. Finite element. Methods in engineering science, Ellis Harwood., England, (1990).
- Ferris P, Prendergast PJ. 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.