

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO VIBROACÚSTICO ACOPLADO DEL OÍDO EXTERNO Y MEDIO HUMANO

PACS: 43.64.Bt

Hidalgo Otamendi, Antonio¹; Morcillo López, Miguel Ángel², Vallejo Valdezate, Luis Ángel³,
Montoya Moreno, Felipe⁴; López Valdés, Francisco⁵
^{1 y 2} Fundación CIDAUT

Parque tecnológico de Boecillo, P.209. 47151, Boecillo, Valladolid, España Tel. +34 983548035
Fax: +34 983 548 062

E-mail: anthid@cidaut.es¹; migmor@cidaut.es²

³ Cátedra de ORL. Hospital Universitario "Del Rio Hortega" Universidad de Valladolid

C/ Rondilla de Santa Teresa s.n., 47010 Valladolid España Tel. +34 983 420 400

E-mail: vallejoval@telefonica.net³

^{4 y 5} Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería,
Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los
Procesos de Fabricación, E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid

Paseo del Cauce, s/n, Valladolid, 47011, España, Tel. +34 983 423 384,

E-mail: felmon@dali.eis.uva.es⁴; fralop@dali.eis.uva.es⁵

ABSTRACT

In this paper is presented a complete model for the simulations of the vibrational and acoustical behaviour of the external and medium human ear. The middle ear transmits the sound energy through vibrations and the external ear transmits it in the air through acoustic wave. The energy conversion is done in the tympanic membrane. The simulation model should be an acoustic-vibration coupled model, which is solving simultaneously.

RESUMEN

En el artículo se describe un modelo completo de simulación mediante elementos finitos para reproducir el comportamiento vibratorio del oído externo y acústico del oído medio acoplados. El oído medio transmite la energía sonora por medio de vibraciones, mientras que por el oído externo esta energía se transmite por el aire en forma de onda acústica. La conversión de la energía se realiza en la membrana timpánica. El modelo de simulación debe ser, por lo tanto, un modelo acoplado acústico-vibratorio que se resuelva simultáneamente.

1. INTRODUCCIÓN

El oído externo por medio del conducto auditivo capta las ondas acústicas que son transportadas por el aire. En el tímpano estas ondas acústicas son transformadas en vibraciones que son transportadas por el oído medio a través de los huesecillos hasta la cóclea lugar en el que serán transformadas en impulsos eléctricos. Desde que el sonido es emitido hasta el momento en el que la vibración se transforma en un potencial eléctrico, esta energía sigue las leyes de la mecánica y por tanto su comportamiento puede ser modelizado numéricamente.

Para comprender el comportamiento del oído externo y el oído medio, en cuanto a la fisiología de la audición se refiere, podemos utilizar modelos biológicos animales o humanos (**STINSON & LAWTON 1989**; **HUDDE 1983**), modelos físicos o modelos matemáticos (**HUDDE & ENGELS 1997**).

En el trabajo que nos ocupa describimos los pasos realizados hasta modelizar tridimensionalmente el oído externo y el oído medio mediante el método de los elementos finitos.

2. OBJETIVOS Y METODO DE SIMULACIÓN

En el trabajo desarrollado tiene como objetivo el conseguir un modelo de elementos finitos del oído externo y medio humanos que reproduzca el comportamiento dinámico del mismo y cuya función de repuesta entre la entrada al conducto auditivo y la salida en el estribo (ventana oval) sea similar al real.

Este modelo, una vez puesto a punto servirá para prever el comportamiento de prótesis osiculares para la sustitución total o parcial de los huesecillos del oído medio, y poder hacer una optimización de su diseño, de sus materiales o de su forma de colocación en el oído.

Además el modelo pretende arrojar alguna luz sobre la función de la cadena de tres huesecillos, en contraposición al único huesecillo que poseen las aves o los reptiles. Hasta el momento no hay una razón convincente que justifique que la naturaleza haya realizado esta complicada evolución hasta disponer de tres huesecillos.

Como se ha dicho en la introducción las ondas acústicas son captadas por el pabellón auricular y transportadas a través del conducto auditivo hasta el tímpano. En este dominio el paso de la energía es a través de un fluido y por lo tanto las ecuaciones aplicables son las de la acústica. De este modo la ecuación de campo que se debe resolver es la acústica y el modelo de elementos finitos deberá resolver esta ecuación.

Por otra parte este modelo acústico interactúa con el oído medio en el que la principal vía de transmisión es vibratoria. El modelo CAE vibratorio a resolver se debe acoplar con el anterior en el tímpano, donde las ondas acústicas inciden y son transformadas en vibraciones sobre la cadena de huesecillos.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO VIBRATORIO DEL OIDO MEDIO

Definiremos brevemente los componentes del modelo (**Figura 1**) así como sus propiedades más importantes a fin de comprender el proceso de ensamblamiento con el modelo del conducto auditivo externo.

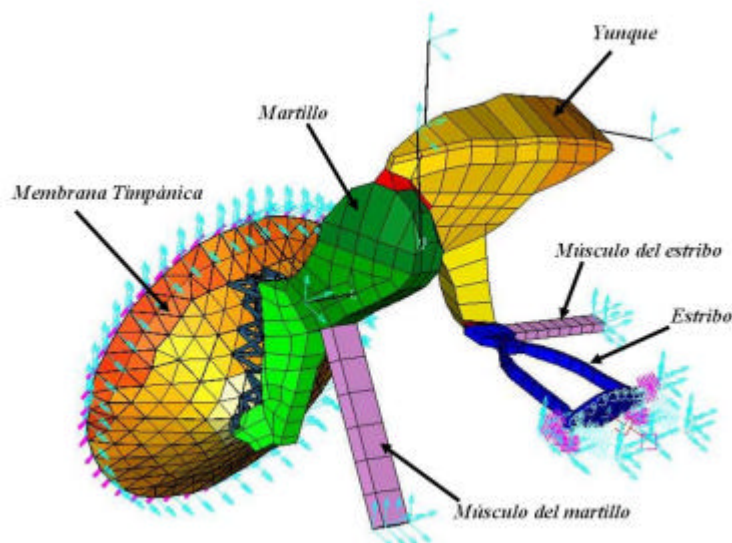


FIG.1.- Visión General del Conjunto con condiciones de contorno.

Membrana Timpánica :

El tímpano es una membrana de un espesor muy pequeño pero de una gran robustez en forma de cono de vértice desplazado, lo cual hace que su corte transversal sea un cono con una línea curva. Está formada por diferentes tipos de fibras: radiales, circulares, parabólicas y semilunares. El epitelio timpánico no es de espesor constante sino que tiene diversidad de espesores a lo largo de toda su área. Debido a las características del tímpano, el tipo de elemento que más se ajusta a sus condiciones era el tipo MEMBRANA, elementos bidimensionales con cuatro nodos. Las fibras fueron modeladas mediante elementos BEAM o tipo barra que son elementos bidimensionales con dos nodos, estos elementos son de sección circular.

Una vez que el tímpano estaba modelado, se le impusieron unas ciertas condiciones de contorno. Se definió un anillo timpánico de características óseas alrededor de la membrana timpánica que se consideró rígido (desplazamientos nulos), y a él se le unió la membrana mediante unos elementos que posibilitaban los 6 grados de libertad relativos de la membrana respecto al anillo timpánico, pero, por supuesto, regidos por los respectivos coeficientes de rigidez translacional y rotacional. Estas condiciones de contorno se colocaron en todos los nodos de la periferia de la membrana.

Martillo:

El martillo es el huesecillo más próximo a la membrana timpánica y se encuentra apoyado directamente sobre ella adhiriendo su mango y su apófisis externa sólidamente en el espesor de la membrana timpánica. Estas apófisis y la propia base del martillo se unen a la cabeza a través del cuello. La cabeza del martillo, situada en el ático de la cavidad timpánica, tiene por atrás y dentro una carilla articular que le sirve de unión con el yunque.

Lo que iba a ser común a la hora de modelar estas uniones era el tipo de elemento elegido que en este caso al ser un elemento sólido sería un elemento SOLID, de ocho nodos en caso de hexaedro o de seis nodos en caso de prismas, con lo que ya quedaría definido dicho hueso como FEM (Finite Element Model).

Yunque:

El yunque muestra en su cuerpo una superficie cóncava que sirve de soporte para la carilla articular que le une al martillo. Se divide en tres partes claramente diferenciadas entre sí, cuerpo, del cual sale en dirección hacia atrás, es decir hacia la pared posterior de la caja timpánica la apófisis corta, que va a anclarse en la *fosa includis* de dicha pared, y además, posee una apófisis larga que desciende vertical, la cual se articula a la cabeza del estribo por medio del proceso lenticular (extremo distal de la rama larga del yunque).

A la hora de modelar este huesecillo se siguió un proceso semejante al seguido en el martillo, con lo que, al tratarse también de un elemento sólido, se empleó de igual forma un elemento SOLID.

Estribo:

Este último hueso es el encargado de transmitir el movimiento y, por lo tanto, comprimir el líquido que se encuentra en el oído interno. Este huesecillo se encuentra unido a la ventana oval a través del ligamento anular. El estribo se compone de una cabeza articular a la que se transmite directamente el movimiento del yunque, y dos brazos o *cruras* que terminan en la platina, o base del estribo que es la que se une en su extremo a la ventana oval.

La modelización de este huesecillo se realizó de forma análoga a los anteriores empleando de igual modo elementos tipo SOLID, al tratarse de un elemento sólido.

Cóclea:

Para especificar las condiciones de contorno correspondientes a la impedancia de la cóclea se siguió el modelo propuesto por Hudde (1998). Aunque este modelo es unidimensional del oído medio, se comprobó que la respuesta del sistema con estos valores era buena y se aproximaba de forma bastante eficaz al comportamiento real del oído medio humano.

En lugar de emplear un solo muelle para modelizar esta rigidez de la cóclea se utilizó cuatro resortes en paralelo situados en los vértices de la placa del estribo. Sin embargo, todo el efecto del amortiguador se consideró aplicado en el punto central de la base del estribo. Se situó una masa puntual en el extremo del amortiguador. Todo el sistema sólo es susceptible de moverse en la dirección del eje Z. Para asegurar que el movimiento se realizaba solamente en la dirección deseada, se situaron resortes de rigidez infinita en el contorno del estribo con las direcciones de los ejes X e Y de un sistema de ejes ortogonal.

Unión Tímpano-Martillo:

Para modelar esta unión se partió del hecho de que el martillo se encuentra apoyado sobre la membrana timpánica y está rígidamente anclado a ella. Para ello se empleó elementos tipo BEAM y se les dotó de una gran rigidez para que la unión no se deformase.

Unión Martillo-Yunque:

La unión entre el yunque y martillo está formada por una serie de fibras que unen las partes extremas de ambos huesos y que en su parte más interna se encuentra un líquido. Según la concepción que más se adapta a la realidad, la unión no se mueve en ningún momento ante sonidos ordinarios, sólo si esta intensidad supera cierto nivel emprende un movimiento articular por el cual la amplitud vibratoria del yunque no excede cierto nivel. Se interpreta como un mecanismo de protección. Por esta razón, se modeló la unión con una serie de elementos MEMBRANA uniendo ambos huesos para simular una unión hueca en cuyo interior iría alojado un líquido.

Unión Yunque-Estribo:

Al igual que la unión anterior, esta unión se modeló mediante elementos MEMBRANA pues se sabía que esta unión se hace por un entramado de fibras de muy bajo espesor que están dispuestas en forma de manguito y que recubren la parte final de la apófisis larga del yunque y la unen con la cabeza del estribo.

Ligamentos del oído medio:

Los ligamentos del oído tienen la misión de sujetar la cadena de huesecillos en el interior de la cavidad timpánica fijando más o menos su posición y de alguna manera limitar sus desplazamientos a unos valores no muy elevados. Fueron representados como elementos de tipo BEAM.

Estos ligamentos en el oído tendrán función activa protectora, según las teorías actuales. En cualquier caso tendrán un comportamiento dinámico ante estímulos auditivos determinados. En el modelo creado estos ligamentos son elementos pasivos. Es decir, se simulará el comportamiento de la cadena de huesecillos para una determinada posición de estos músculos.

Del modelo así obtenido se realizó un análisis modal vibratorio desde la mínima frecuencia hasta el rango frecuencial audible (2Hz-20.000 Hz). Esta base modal obtenida es la información necesaria para el acoplamiento posterior con el modelo acústico, ya que en ella se encuentra toda la información necesaria para reproducir el comportamiento vibratorio del sistema.

Es decir, las matrices Masa, Rigidez y de Amortiguamiento del sistema son normalizadas y obtenidos sus valores propios (frecuencias propias) y vectores propios (modos de vibración). Trabajando en adelante en esta base modal.

Las propiedades de cada elemento del oído medio son las siguientes:

Nº	Material	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de Young (Pa)	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Amortiguamiento
1	Tejido de Membrana biológica	1.200	3,30E+07	0,29	0,35
2	Músculo del Estribo	1.200	5,20E+05	0,2	0,2
3	Músculo del martillo (timpánico)	1.200	2,60E+06	0,2	0,2
4	Anillo Timpánico	500	2,10E+15	0,29	0,35
6	Ligamentos del yunque	1.200	6,50E+05	0,29	0,3
7	Ligamento superior martillo	1.200	6,50E+05	0,3	0,25
8	Ligamento anterior lateral martillo	1.200	2,10E+07	0,3	0,25
9	Martillo (cuello)	4.530	1,41E+10	0,2	0,05
10	Martillo (base)	3.700	1,41E+10	0,2	0,05
11	Martillo (cabeza)	2.550	1,41E+10	0,2	0,05
12	Unión Tímpano-Martillo	50	2,00E+10	0,29	0,25
13	Unión Martillo-Yunque	1.200	2,00E+10	0,4	0,25
14	Unión Yunque-Estribo	1.200	7,00E+05	0,3	0,3
15	Yunque (apófisis corta)	2.260	1,41E+10	0,2	0,05
16	Yunque (cuerpo)	2.360	1,41E+10	0,2	0,05
17	Yunque (apófisis larga)	5.090	1,41E+10	0,2	0,05
18	Estribo	2.200	1,41E+10	0,2	0,717
37	Tejido de fibra radial	1.200	1,00E+07	0,3	0,35
38	Tejido fibra parabólica	1.200	1,00E+07	0,3	0,35
52	Tejido fibra semilunar	1.200	1,00E+07	0,3	0,35

4. MODELO ACUSTICO OÍDO EXTERNO

A partir de un molde extraído del conducto auditivo de un paciente se obtuvo la geometría del eje del mismo. No se pudieron aprovechar también las superficies externas por la mala calidad superficial obtenida, como se observa en la figura 2.

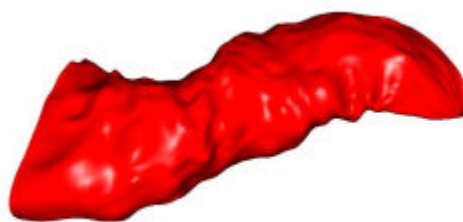


Fig. 2. Modelo CAD obtenido por molde

A partir de este eje, lo que hicimos fue dividirlo en tantas partes, equidistantes entre sí sobre la longitud del eje curvo, como número de secciones conocíamos a partir de los datos aportados por **Stinson y Lawton**.

Basándonos en estos puntos de división construimos planos normales a la tangente del eje curvo en cada punto, y sobre ellos dibujamos las secciones con su forma correspondiente. Una vez construidas todas las secciones procedimos a cubrirlas mediante una envolvente que contuviera a todas ellas.

En una primera aproximación se realizaron las secciones con forma elíptica, si bien pronto se desecharon y se sustituyeron por secciones circulares que mantuvieran el área conocida del conducto y que discurren por la línea media definida. Para ello hicimos uso de las muestras aportadas por **Stinson y Lawton**. Los parámetros que definen las proyecciones de los ejes curvos de quince individuos diferentes sobre dos planos vienen establecidos mediante las siguientes expresiones

$$g_x(z) = a_1 + a_2 \cdot z + a_3 \cdot \cos(\mathbf{b} \cdot z) + a_4 \cdot \cos(2\mathbf{b} \cdot z) + a_5 \cdot \text{sen}(\mathbf{b} \cdot z) + a_6 \cdot \text{sen}(2\mathbf{b} \cdot z)$$

$$g_y(z) = b_1 + b_2 \cdot z + b_3 \cdot \cos(\mathbf{b} \cdot z) + b_4 \cdot \cos(2\mathbf{b} \cdot z) + b_5 \cdot \text{sen}(\mathbf{b} \cdot z) + b_6 \cdot \text{sen}(2\mathbf{b} \cdot z)$$

El modelo resultante fue el elegido ya que era el que mejor se ensamblaba con el modelo del oído medio y cuyas respuestas más se acercaban a las mediciones reales. Una vez obtenido el modelo CAD esté fue mallado para llegar a las frecuencias requeridas de 20.000 Hz y el resultado se muestra en la figura 3.

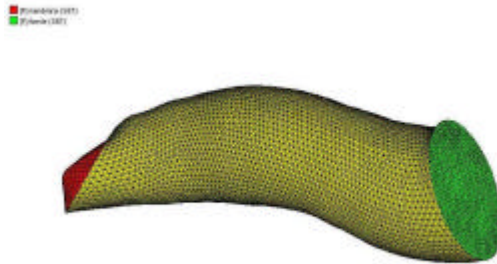


Figura 3 Mallado FEM del canal auditivo

5. MODELO ACOPLADO

Una vez elegida la geometría del conducto procedimos a ensamblar nuestro modelo con el modelo que componen la membrana timpánica y los huesecillos. Lo hicimos a través de la sección circunferencial que habíamos construido previamente en el extremo interno del CAE. El resultado queda representado en la Figura 4.

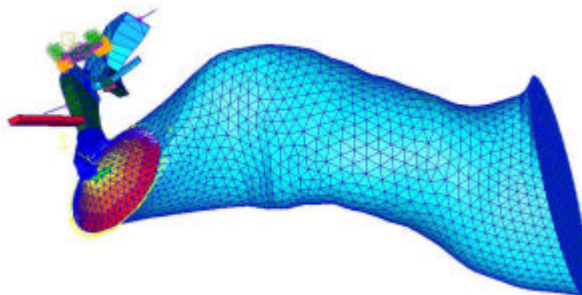


Figura 4. Modelo acoplado oído medio y conducto auditivo

Este modelo acoplado recibirá las excitaciones acústicas en el extremo del conducto auditivo y responderá con vibraciones en su extremo contrario que serían transmitidas a la ventana oval y posteriormente a la cóclea. La validación experimental del modelo se deberá realizar por medio de la respuesta acústica frecuencial de todo el sistema a un frente de ondas conocido, que es lo que se denomina impedancímetro. Este aparato valora la impedancia acústica del tímpano, que será la resultante de toda la cadena de huesecillos y de todo el oído interno.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Funnell WRJ; Laszlo CA.** Modeling of the cat eardrums as a thin shell using the finite-element method. *J Acoust Soc Am* 1978; 63: 1461-1467
- [2] **Decraemer WF; Khanna SM; Funnell WRJ.** Malleus vibration mode changes with frequency. *Hear Res* 1991; 54: 305-318.
- [3] **Ferrazzini, M.** Virtual middle ear: a dynamic mathematical model based on the finite element method. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology. (2003)
- [4] **Ferris, P., Prendergast, P.J.** Middle-ear dynamics before and after ossicular replacement. *Journal of Biomechanics* 33 (2000) 581 – 590.
- [5] **Voss SE; Allen JB.** Measurement of acoustic impedance and reflectance in the human ear canal. *J Acoust Soc Am* 1994; 95: 372-384
- [6] **Hudde H; Engel A.** Measuring and modeling basic properties of the human middle ear and ear canal. Part III: Eardrum impedances, transfer functions and model calculation. *Acta Acustica* 1998; 84: 1091-1109
- [7] **Stinson MR y Lawton BW.** Specification of the geometry of the human ear canal for the prediction of sound pressure level distribution. *J Acoust Soc Am* 1989; 85: 2492-2502
- [8] **Khanna SM; Decraemer WF.** Vibration modes and the middle ear function. In: *Middle ear mechanics in research and otosurgery.* Hüttenbrink KB. Ed. DRESDEN. ISBN: 3-86005-193-8. 1997:21-26
- [9] **Huber A; Asai M; Ball G; Goode RL.** Analysis of ossicular vibration in three dimensions. In: *Middle ear mechanics in research and otosurgery.* Hüttenbrink KB. Ed. DRESDEN. ISBN: 3-86005-193-8. 1997:82-87