

Estudio de la influencia de la conicidad en la transmisión del sonido de la membrana timpánica.

Juan Carlos Neff¹, Antonia Maria Lima-Rodriguez²
Antonio Gonzalez-Herrera³, Jose Manuel Garcia-Manrique⁴

¹Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga, España. Email: juancarlosneff@uma.es

²Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga, España. Email: tlima@uma.es

³Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga, España. Email: agh@uma.es

⁴Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación, Universidad o Institución, País. Email: josegmo@uma.es

Resumen

El mecanismo de transmisión del sonido de la membrana timpánica (MT) es un sistema complejo afectado por multitud de parámetros cuyo comportamiento aún no se comprende por completo. La influencia de la forma cónica de la MT es uno de ellos. Este trabajo presenta algunos de los resultados obtenidos sobre la influencia de la forma cónica mediante un modelo numérico simplificado que simula la transmisión del sonido en una membrana con diferentes niveles de conicidad. Se han realizado diferentes análisis para conocer las frecuencias y modos de vibración característicos de los diferentes modelos de membranas. Los resultados indican que existen ciertas diferencias entre los distintos tipos de modelos. La principal característica de los sistemas cónicos es el aumento de su rigidez, especialmente en su zona central y a mayor altura de cono.

Palabras clave: membrana timpánica, transmisión de sonido, conicidad, análisis de elementos finitos.

Abstract

The sound transmission mechanism of the tympanic membrane (TM) is a complex system, affected by multiple parameters, whose behaviour is not completely understood yet. The influence of the conical shape of the TM is one of them. Simplified models suggest a better efficiency on sound transmission. This paper quantifies the influence of the conical shape by means of a simplified numerical model that simulate the sound transmission in a membrane with different level of conicity. Several analysis has been carried out in order to know the characteristic frequencies and vibration modes for the different types of membranes. The results indicate that there are certain differences between the various types of models. The main characteristic of conical systems is the increase of its stiffness, especially in its central area and at a higher cone height.

Keywords: tympanic membrane, sound transmission, conicity, finite elements analysis.

1. Introducción

Los humanos nos comunicamos generando ondas de presión a través del aire y el oído las transforma hasta ser estímulos eléctricos para el cerebro. El mecanismo auditivo es un sistema complejo donde intervienen procesos mecánico-acústicos. El oído humano se divide en tres zonas: oído externo, oído medio y oído interno. El oído externo está formado por el pabellón

auricular y el canal auditivo. En el oído medio se encuentra la membrana timpánica (MT), comúnmente llamada tímpano, conectada a tres huesecillos: el martillo, el yunque y el estribo. El primer paso del proceso de transducción tiene lugar en la MT. Es la encargada de transformar las ondas sonoras en vibraciones mecánicas debido a su movimiento. Estas vibraciones son conducidas lo largo de la cadena

osicular hasta el oído interno, donde las vibraciones mecánicas se transforman en impulsos nerviosos [1].

La transmisión exitosa de estas vibraciones acústicas se atribuye a la peculiar arquitectura que forma la TM. Sin embargo, se dispone de un conocimiento limitado sobre la contribución de sus características anatómicas en el proceso de transmisión, lo cual es importante para fabricar reemplazos de MT funcionales, por ejemplo, a través de la impresión 3D. Numerosos estudios han investigado su funcionamiento, realizando algunas simplificaciones geométricas como considerar la membrana como una placa plana cuando en realidad tiene forma de cono con sus paredes ligeramente curvadas [2]. Si se observa la membrana desde el canal auditivo, se puede ver la forma convexa de la membrana, con su vértice en el umbo. El tímpano está formado por un tejido delgado en el que se distinguen dos partes: una parte tensa y una parte flácida más pequeña [3]. La parte flácida no se encuentra tensionada, por lo tanto, su significado mecánico es menos importante. La parte tensa se compone de una estructura trilaminar: una capa epidérmica externa, una capa de fibras de colágeno y una capa mucosa interna. Gracias a micrografías electrónicas se puede saber que existen dos tipos de fibras diferentes según su disposición, fibras circulares y radiales. Estas fibras son las que aportan rigidez a la membrana y además, las fibras circulares son las que mantienen la forma convexa de la membrana [4][5].

En este trabajo se pretende aportar datos que ayuden a conocer mejor cómo varía el mecanismo de transmisión timpánico en función de distintas características geométricas. Mediante la simulación de un modelo computacional por elementos finitos se obtienen las respuestas mecánico-acústicas de la MT, obteniendo sus modos de vibración, frecuencias naturales y demás parámetros característicos.

2. Metodología

En primer lugar, se han realizado varios modelos simplificados de la membrana timpánica mediante el uso del programa ANSYS. Para llevar a cabo estos modelos se han definido numerosos parámetros. El primer parámetro es el rango de frecuencias de estudio, que coincide con el espectro audible para un oído humano, entre 0 y 20 kHz. Las medidas anatómicas y las propiedades mecánicas están basadas en publicaciones que caracterizan el tímpano humano. Las diferencias en las propiedades geométricas y materiales afectan a las funciones de transferencia. En cualquier caso, las propiedades del material son las mismas para todos los modelos. Las propiedades geométricas son las que sufren modificaciones en los diferentes modelos. Todos los modelos están basados en una membrana circular de 10 mm de diámetro y 50 μm de espesor. Otros dos parámetros que sí se

modifican son la altura del cono de membrana (H) y la curvatura de sus paredes (C). La TM tiene una altura de cono de unos 1,7 mm y es ligeramente convexa. A continuación se comentan la geometría de los diferentes modelos. El modelo de referencia es una placa plana, a partir de este, se va incrementando la altura en el centro para crear diferentes grados de conicidad. Los modelos propuestos tienen una altura de cono H de 0.5, 1, 1.5 y 2 mm. Esto permite conocer la influencia de este parámetro en el comportamiento del tímpano. El siguiente parámetro para identificar es la curvatura de las paredes de la membrana C . En este caso las paredes pueden tener forma convexa, cóncava o cónica. El parámetro C se toma porcentualmente, siendo 0% una geometría cónica y 100% la curvatura máxima admisible para ser considerada cóncava o convexa. En la Figura 1b se muestra el porcentaje de curvatura para membranas cóncavas y convexas.

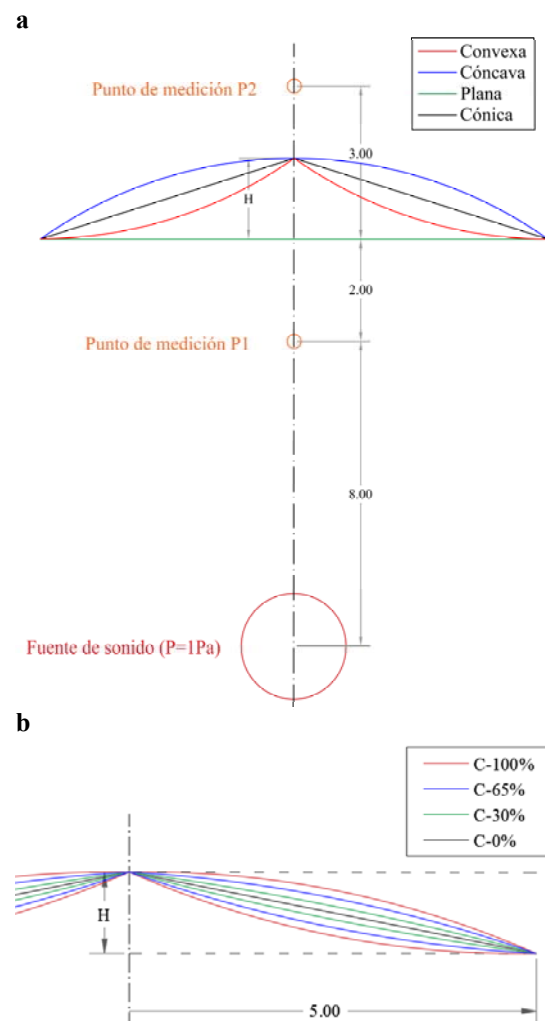


Figura 1. Esquema diferentes modelos. **a** Distancias entre fuente, puntos de medida y membranas. **b** Porcentajes de curvatura.

La MT divide el volumen fluido en dos zonas. En cada una de las zonas se tomarán medidas de presión, entre la fuente de sonido y la membrana (P1) y la zona posterior a la membrana (P2). La función de transferencia (T21) se obtiene haciendo el cociente $P2/P1$ y proporciona información sobre la relación de transmisión de una zona a otra. La fuente de sonido es una esfera de 4 mm de diámetro y se encuentra a una distancia de 10 mm del plano horizontal que contiene el perímetro de la membrana. Se aplica una presión de 1Pa sobre la superficie de la fuente de sonido.

El modelo cuenta con dos tipos de elementos. Por un lado se encuentra la MT que se malla con elementos de tipo sólido y por otro lado el entorno fluido que lo rodea, en este caso aire. Las propiedades mecánicas utilizadas para la MT modelos son: Módulo de Young 32 MPa, coeficiente de Poisson 0.35, coeficiente de amortiguamiento 0.01 y densidad 1200 kg/m³. Se ha elegido un coeficiente de amortiguamiento muy bajo para magnificar la respuesta del sistema y observar los efectos de manera significativa. En consecuencia, se generan picos más diferenciados en la respuesta de las funciones. En realidad, son más suaves. Las propiedades del material fluido son: coeficiente de absorción acústica 0.01, velocidad del sonido 343 m/s y densidad del aire 1,21 kg/m³ [6].

Los elementos cúbicos con ocho nodos y tres grados de libertad en cada nodo se utilizan para mallar la MT, se utiliza tipo de elemento SOLID185 dentro del software utilizado. Para simular el medio fluido, se utiliza el elemento FLUID30 con las propiedades del aire. En la superficie exterior de la esfera de fluido, se implementa la condición límite de absorción de segundo orden FLUID130, de modo que la onda de presión saliente que alcanza el límite del modelo se absorbe, con una reflexión mínima en el dominio. La ecuación de onda en las tres dimensiones es una ecuación que controla el problema acústico y se discretiza considerando el acoplamiento de la presión sonora y el movimiento estructural en la interfaz entre la membrana y el aire.

Para la discretización del volumen de aire, se debe considerar la longitud de onda del sonido en el rango de frecuencias sonoras audibles que va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, es decir, las longitudes de onda entre 17,15 m 17,15 mm, respectivamente. El tamaño del elemento está limitado por la longitud de onda mínima de la que se quiere obtener información, que en este caso corresponde a una longitud de onda de 20 kHz (17,15 mm). Para tener una información de los elementos lo suficientemente cercana a la realidad, se ha decidido dividir esta longitud de onda por 10, de forma que se obtiene un tamaño máximo del elemento fluido de 1.175 mm. Para los elementos sólidos se estipula un tamaño tres veces superior al espesor de la membrana, comprobándose que no es necesario un menor dimensionamiento. Se ha optado por un tamaño

de 0,15 mm. Debido a la simetría del modelo, solo se malla un cuarto del modelo. Las restricciones de movimiento y giro se imponen sobre todo el perímetro de la membrana. Debido a la simetría del modelo solamente se malla un cuarto, imponiendo las condiciones de contorno en los dos planos de simetría. En la Figura 2a se observa el mallado del modelo para una membrana convexa.

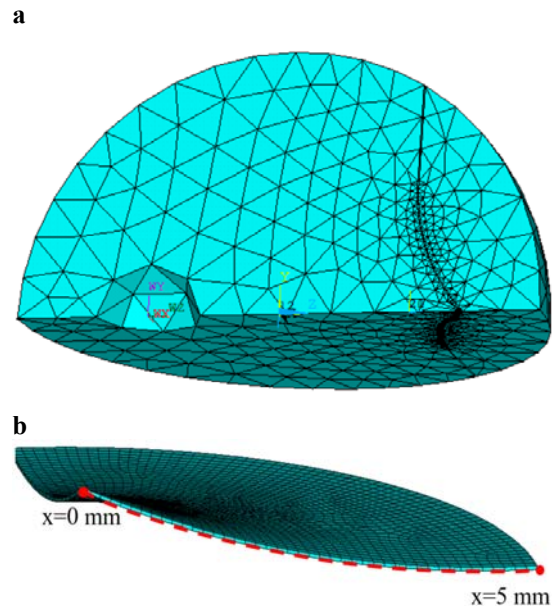


Figura 2. Mallado del modelo. **a** Completo con condiciones de simetría. **b** Membrana y línea de la que se obtienen los resultados del análisis armónico.









































Se han realizado análisis a los cuatro tipos de modelos (membrana plana, cónica, convexa y cóncava) variando su altura H y su curvatura C. En primer lugar, se realiza un análisis modal para identificar los modos de vibración y sus frecuencias naturales. Seguidamente, mediante un análisis armónico se obtienen resultados cuantitativos sobre presiones y deformaciones en la pared de la membrana. Se obtienen además las funciones de transferencia entre las dos zonas separadas por la membrana.

3. Resultados

3.1. Análisis modal

Para todos los tipos de modelos se ha realizado su análisis modal con el fin de obtener sus modos característicos y a la frecuencia a la que estos se producen. En la Tabla 1 se presentan algunos de ellos indicando el tipo de modelo. Se presentan los resultados obtenidos para una altura H de 1,5 mm.

Tabla 1. Modos de vibración para los diferentes modelos

Tipo	H	Modos y frecuencias (Hz)									
Plana	0mm										
		165	345	568	650	833	995	1138	1389	1466	1483
Convexa	1.5mm										
		710	845	1380	1776	2168	2281	2328	2465	2590	2847
Cono	1.5mm										
		1290	1344	1510	1549	1842	2058	2203	2294	2345	2398
Cóncava	1.5mm										
		2675	2821	2963	3013	3039	3115	3208	3236	3304	3312

Los modelos en los que la membrana es curva (cóncava y convexa) el porcentaje de curvatura C usado es del 100%. En la primera fila de la tabla se encuentran los diez primeros modos para una membrana plana. Estos modos son ampliamente conocidos y nos aportan un punto de referencia para realizar las comparativas con el resto de modelos. En primer lugar, se puede observar como los tres modelos que tienen altura presentan frecuencias naturales más altas para todos sus modos. Esto significa que aumenta la rigidez del mecanismo, algo esperado ya que las paredes cónicas forman cierto ángulo con las ondas de presión, siendo más estable que la membrana plana. A mayor altura, más rigidez se aporta a la membrana. El modelo que más se asemeja a las TM es el modelo convexo con una altura de 1.5 mm. El modelo cóncavo es el que presenta las frecuencias más altas.

Los modelos cono y convexo, los cuales tienen en común que en su centro aparece un vértice, se aprecia que los mayores desplazamientos no tienen lugar en dicho vértice sino en las paredes intermedias entre el perímetro y el centro. Esto es debido a la rigidez que existe en esa zona central. Además, en estos modelos, el aumento de altura también provoca una rigidización de la zona central. Por el contrario, en los modelos en los que su superficie central no sufre cambios bruscos de ángulo y permanece plana, modelo plano y cóncavo, se observa la aparición del máximo desplazamiento en dicha zona. Esto se puede apreciar con más precisión en los modos donde existe una simetría radial completa, por ejemplo, en los modos 1, 4 y 9 del modelo plano).

3.2. Desplazamientos y presiones en la membrana

En este apartado se recogen los resultados de los desplazamientos de la membrana y las presiones en su cara más cercana a la fuente de sonido. Se ha realizado un análisis armónico mediante una excitación sonora con una presión unitaria de 1MPa dentro del rango de frecuencias audibles entre 0-20kHz. Estos datos aportan información cuantitativa sobre los modelos y permite comparar las magnitudes de los parámetros. La localización de los puntos de datos recogidos viene indicada en la Figura 2b, recorre uno de los radios exteriores del modelo. Se ha utilizado la misma escala de valores para poder ver las diferencias al variar las diferentes alturas y modelos. El porcentaje de curvatura para este grupo de resultados es el del 100%.

la Figura 3 se pueden observar varias graficas de desplazamientos para diferentes modelos. Cuanto menor altura tiene la membrana los modos de vibración aparecen a frecuencias más bajas. También se comprueba que a frecuencias bajas los desplazamientos tienen mayor relevancia, con picos entorno a los 0.01 mm

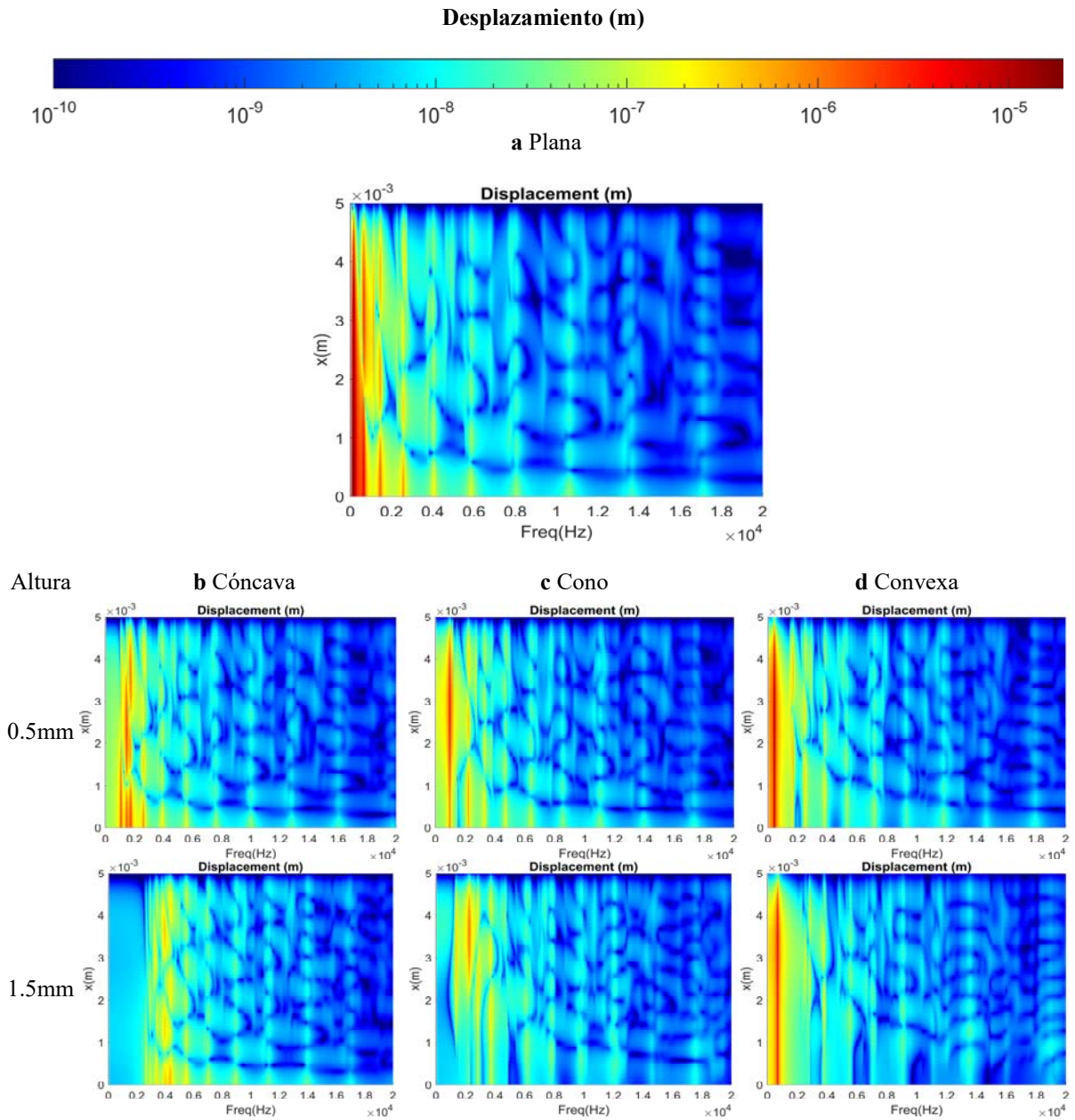


Figura 3. Desplazamientos de MT. **a** Plana. **b** Cónica. **c** Cónica. **d** Convexa

La Figura 4 muestra las presiones en decibelios (dB). Tomando como referencia la fuente de sonido con 0 dB, el resto de valores alejados de ella sean menores y por tanto, negativos. A frecuencias bajas se observan los saltos de presión cuando el modo de vibración toma más relevancia. Para todos los modelos, entre los 10 y 20 kHz las presiones aumentan, sobretodo en la zona central de la membrana.

modelo convexo, el cual es el más similar al timpano humano real. Por tanto, en situaciones en las que no se pueda usar una membrana convexa y se fuerce el uso de una geometría simplificada, como por ejemplo un ensayo experimental, el uso de una membrana plana podría considerarse apta. Aunque se considere apta se debe tener en cuenta las diferencias entre ellas para poder discriminar los resultados.

Tanto en las graficas de desplazamientos como de presiones el modelo mas parecido a la placa plana es el

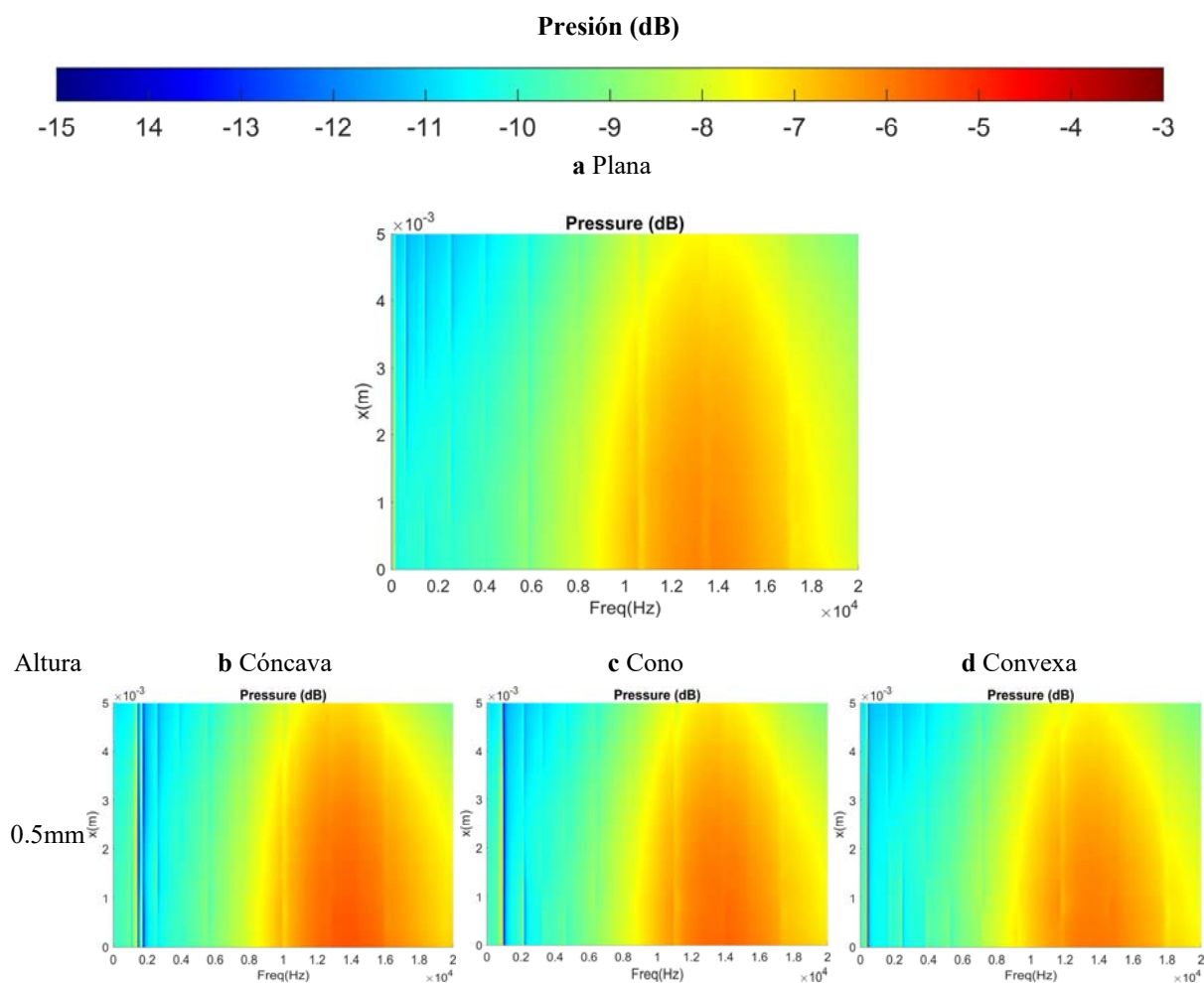


Figura 4. Presiones de MT. **a** Plana. **b** Cónca. **c** Cónica. **d** Convexa

3.3. Función de transferencia

Las funciones de transferencia se obtienen a través de las mediciones y el cociente entre los puntos P1 y P2 representados en la Figura 1a. Esta función aporta información de cuanta presión, o energía, es capaz de transmitirse a través de la membrana y pasar a la zona posterior. Se han comparado las diferentes funciones de transferencia para los diferentes modelos, alturas y curvaturas.

Observando las gráficas de la Figura 4 se puede obtener información relevante. En primer lugar se puede diferenciar una zona con grandes picos en todos los modelos para frecuencias relativamente bajas. En algunos tramos de los modelos Cónico y convexo se supera la unidad, produciéndose un fenómeno de

amplificación en la transmisión del sonido entre los dos puntos donde se realiza la medición. Estos modelos vuelven a ser los que presentan un vértice en su centro. También se puede ver como los picos de las funciones aumentan o disminuyen al modificar la altura H . La segunda zona que se observa es una zona de estabilización para frecuencias altas. Todos los modelos se estabilizan aproximadamente entorno al valor 0.05, es decir, la MT deja pasar a través de ella un 5% del sonido que le llega. Por consiguiente, se deduce que a altas frecuencias la geometría del modelo no es determinante para transferir mayor o menor cantidad de energía. Para una mayor aproximación con la realidad se pueden añadir puntos de medición en diferentes localizaciones de las dos zonas segmentadas.

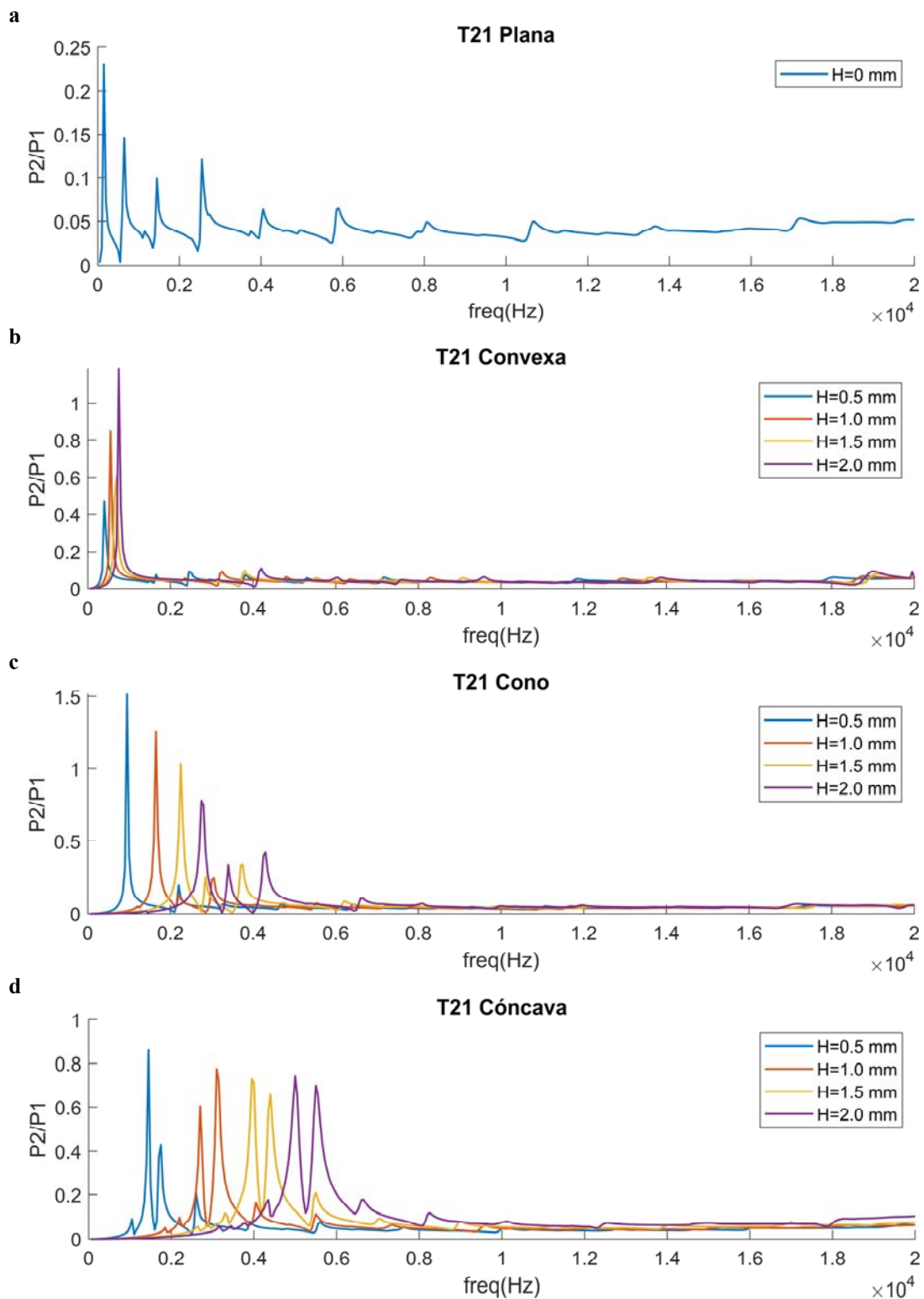


Figura 4. Funciones de transferencia de los modelos. **a** plana. **b** convexa. **c** cónica. **d** cóncava.

4. Conclusiones

Se han presentado resultados sobre un estudio sobre la transmisión del sonido en membranas con forma cónica. Los modelos utilizados son simplificaciones de la membrana timpánica. Se ha puesto de manifiesto la capacidad cualitativa y cuantitativa de los modelos para transmitir el sonido de un punto a otro. Se ha mostrado cómo la variación de las características geométricas influye en los modos de vibración y sus frecuencias naturales. Los resultados indican que existen diferencias entre los distintos tipos de modelos.

La principal característica de los sistemas cónicos es el aumento de su rigidez, especialmente en su zona central y aquellos modelos que poseen un vértice en el centro. Además, la altura del cono es directamente proporcional a la rigidez de la membrana. Entre los tres tipos de membranas estudiados, el que más se parece a la membrana plana es la membrana convexa. Esto permitirá hacer simplificaciones y utilizar membranas planas en el caso de ser necesarias ya que se conocen los cambios que esto provoca.

Respecto a la relación de transmisión. Para bajas frecuencias cada modelo cuenta con una zona de picos bastante bien caracterizados. Para altas frecuencias la relación se mantiene entre un 2% y 5% para todos los modelos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa FEDER, número de beca UMA18-FEDERJA-214 y la Universidad de Málaga.

6. Referencias

[1] Von Helmholtz, H. Die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells, Pfluegers Archiv. 1, 1–60 (1868). (Translated as: The Mechanism of the Ossicles of the Ear and the Membrane Tympani (William Wood and Co., New York, 1873).

[2] Gonzalez-Herrera A, Cheng JT, Rosowski JJ “Analysis of the influence of the speaker position on the study of the dynamic behavior of a membrane combining holography technique and finite element models”. In: 22nd International Congress on Sound and Vibration (IIAV). Florence, Italy, 2015.

[3] Jonathan P. Fay, Sunil Puria, Charles R. Steele, “The discordant eardrum”, PNAS, Vol. 103, No. 52, Stanford University School of Medicine, 2006, <https://doi.org/10.1073/pnas.0603898104>

[4] Liu, J., Agrawal, S.K., Ladak, H.M. and Wan, W. Fiber Arrangement in the Rat Tympanic Membrane. *Anat. Rec.*, 299: 1531-1539., 2016, <https://doi.org/10.1002/ar.23461>

[5] Anand, S., Stoppe, T., Lucena, M., Rademakers, T., Neudert, M., Danti, S., Moroni, L., Mota, C., Mimicking the Human Tympanic Membrane: The Significance of Scaffold Geometry. *Adv. Healthcare Mater.* 2021, 10, 2002082. <https://doi.org/10.1002/adhm.202002082>

[6] A. Gonzalez-Herrera and J. Garcia-Manrique, “Numerical study of the mechano-acoustic coupled resonance of a tube-membrane system,” *Meccanica*, vol. 53, no. 13, pp. 3189–3207, 2018, doi: 10.1007/s11012-018-0882-7.