

## ANÁLISIS DE PARÁMETROS CRÍTICOS EN LA CONFIGURACIÓN DE UN ENSAYO NO DESTRUCTIVO PARA MEMBRANAS

Antonia Lima-Rodriguez<sup>1\*</sup>

Luis Caminos<sup>1</sup>

Antonio Gonzalez-Herrera<sup>1</sup>

Jose Garcia-Manrique<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Málaga

### RESUMEN

En este trabajo se analizan los distintos parámetros a determinar en la configuración de un ensayo dinámico no destructivo, cuya finalidad es obtener las propiedades mecánicas de membranas delgadas. Los ensayos tradicionales, algunas veces resultan no adecuados para estos materiales, por tratarse de ensayos destructivos o por utilizar materiales adicionales. Una alternativa a estos ensayos es la elección de un ensayo vibro-acústico no destructivo. Cuando una membrana delgada es sometida a una presión sonora, en ésta se genera una respuesta dinámica función de los modos de vibración de la misma. Se trata de un problema complejo, donde la relación entre las ondas sonoras y la respuesta de la membrana no es fácil de determinar, y requiere un estudio en profundidad para poder obtener esa interacción. Por este motivo es necesario estudiar los parámetros que influyen en la respuesta dinámica de la membrana, para tener la respuesta lo más determinada y acotada posible. Entre los parámetros a estudiar se pueden destacar: la posición de la fuente de sonido, la geometría y dimensiones de la membrana, los puntos a medir, el rango de frecuencias, entre otros. El estudio de estos parámetros es fundamental para determinar la configuración del ensayo dinámico.

### ABSTRACT

In this work, the different parameters to be determined in the configuration of a non-destructive dynamic test are analyzed, whose purpose is to obtain the mechanical properties of thin membranes. Traditional tests are sometimes not suitable for these materials, because they are destructive tests or because they use additional materials. An alternative to these tests is the choice of a non-destructive vibro-acoustic test. When a thin membrane is subjected to sound pressure, a dynamic response is generated depending on its vibration modes. This is a complex problem, where the relationship between sound

waves and the membrane response is not easy to determine, and requires an in-depth study to obtain this interaction. For this reason, it is necessary to study the parameters that influence in the dynamic response of the membrane, to determine and limit the response as much as possible. Among the parameters to be studied are: the position of the sound source, the geometry and dimensions of the membrane, the points to measure, the frequency range, among others. The study of these parameters is essential to determine the configuration of the dynamic test.

**Palabras Clave**— membrana, propiedades mecánicas, ensayo no destructivo, modos de vibración.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales en forma de membrana delgada están presentes en multitud de problemas [1–4], y su aplicación en el ámbito de la ingeniería hace necesario conocer sus propiedades mecánicas.

Sin embargo, determinar las propiedades mecánicas de este tipo de materiales no es tan fácil, sus características particulares, (materiales de pequeño espesor y pequeña rigidez), dificultan su caracterización.

Además, los ensayos tradicionales no siempre son la solución para este tipo de materiales, por tratarse la mayoría de ensayos destructivos o por presentar imperfecciones en los resultados obtenidos.

Por este motivo se busca un ensayo no destructivo, basado en la respuesta dinámica de la membrana, para caracterizarla mecánicamente, concretamente, para obtener el módulo de Young, que es uno de los parámetros más importantes para su modelización.

Hay muchos parámetros que influyen en la respuesta de la membrana, y cuyo efecto sobre ésta es necesario estudiar para concretar la configuración del ensayo [5–7]. Conociendo la influencia de estos parámetros, se podría conocer la

\* *Autor de contacto:* [tlima@uma.es](mailto:tlima@uma.es)

*Copyright:* ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

respuesta dinámica de la membrana, y relacionar esta respuesta con las propiedades mecánicas, en concreto, el módulo de Young.

Entre estos parámetros se podría destacar la posición de la fuente de sonido, la geometría de la membrana, los puntos de medición, el amortiguamiento o el rango de frecuencia a considerar.

En el presente trabajo se estudia la influencia de estos parámetros en la respuesta de la membrana, realizando para ello simulaciones armónicas mediante el programa de elementos finitos ANSYS.

## 2. ESTUDIO TEÓRICO

Las membranas de estudio van a tener una geometría con forma circular, y se van a considerar empotradas en su borde.

Las frecuencias naturales de vibración de una membrana circular se calculan con la Ec. 1, dada por Timoshenko [8].

$$f = \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{gD}{\gamma h}} \quad (1)$$

En la Ec. 1,  $f$  es la frecuencia natural en rad/s,  $a$  es el radio de la membrana,  $\gamma$  es el peso por unidad de volumen,  $h$  es el espesor de la misma,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $D$  es la rigidez a flexión, cuya expresión viene dada en la Ec. 2:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

Es esta ecuación  $E$  y  $\nu$  son el módulo de Young y de Poisson del material, respectivamente.

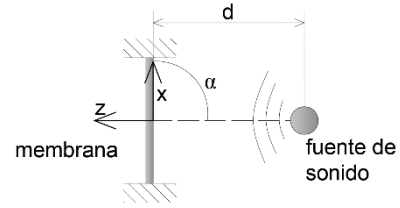
El parámetro  $\alpha$  es una constante cuyo valor cambia para cada modo de vibración a calcular. Fue dado también por el mismo autor [8].

Con las ecuaciones 1 y 2, queda patente que existe una relación entre las frecuencias naturales de la membrana y las propiedades mecánicas del material, en concreto del módulo de Young, que es el principal parámetro que caracteriza al material.

Si se somete a la membrana a un ensayo dinámico controlado, con una geometría conocida, se pueden captar las frecuencias naturales presentes en la misma, y relacionarlas con el módulo de Young del material.

## 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

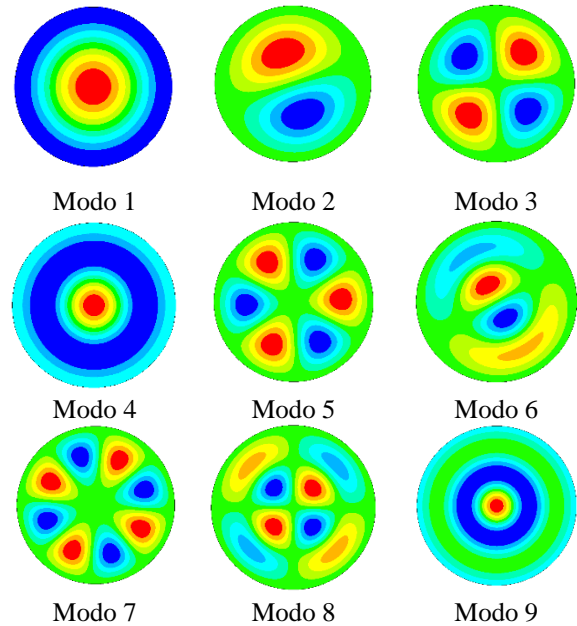
Con el software de elementos finitos ANSYS, se han realizado simulaciones de membranas circulares, donde se le ha sometido a una presión sonora mediante una fuente de sonido. En la Figura 1 se observa un esquema del ensayo simulado.



**Figura 1.** Configuración de los elementos de la simulación.

La fuente de sonido genera una presión sonora, produciendo en la membrana una respuesta dinámica. Se encuentra a una distancia ' $d$ ' del centro de la membrana, y con un ángulo ' $\alpha$ ' entre la fuente de sonido y el plano de la membrana.

En la Figura 2 están representadas las formas modales de los primeros 9 modos de vibración de una membrana circular.



**Figura 2.** Formas modales para los primeros 9 modos de vibración.

Se han realizado simulaciones numéricas de la respuesta de la membrana para evaluar la influencia de distintos parámetros en la misma. Se han usado distintas geometrías de membranas, con distintos espesores, distintas distancias ' $d$ ' de la fuente de sonido, diferentes ángulos ' $\alpha$ ', distintos puntos de medida, presiones en la fuente y amortiguamientos de la membrana.

## 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

Se han realizado simulaciones armónicas de la membrana usando el software ANSYS.

Las geometrías introducidas en el programa han sido: el elemento sólido (la membrana), y los elementos fluidos simulados mediante una esfera que encierra el aire de

alrededor. Los tipos de elementos usados han sido SOLID185 para el sólido, FLUID30 para el aire dentro de la esfera y FLUID130 para la superficie exterior de la esfera, con la que se simula la superficie como infinita.

Para los tamaños de los tipos de elementos, se ha usado un valor de 3 veces el espesor para la membrana, y para los elementos fluidos, el tamaño mínimo depende del tamaño del elemento sólido, mientras que el máximo depende de la longitud de onda de la frecuencia máxima simulada, y se ha tomado este valor dividido por 10. Con estos valores se consigue que los resultados converjan.

Como el problema presenta simetría, se ha modelado teniendo en cuenta las condiciones de simetría correspondientes en el modelo. De esta forma se consigue un ahorro computacional.

Se han tomado como propiedades mecánicas del sólido las de un material tipo plástico, con densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$ , módulo de Young de  $2 \text{ GPa}$  y coeficiente de Poisson de  $0.35$ .

Se han simulado membranas de  $1 \text{ cm}$  de diámetro y varios espesores:  $40$  y  $60 \text{ }\mu\text{m}$ . En cuanto a la posición y disposición de la fuente, se han tomado distancias ' $d$ ' de  $1 \text{ cm}$  y  $5 \text{ cm}$ , y ángulos ' $\alpha$ ' de  $90^\circ$  y  $45^\circ$ . Los valores de las presiones en la fuente considerados han sido de  $1 \text{ Pa}$  y  $0.1 \text{ Pa}$ . Como coeficientes de amortiguamiento se han tomado los valores de:  $1\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$  y  $20\%$ .

En cuanto al rango de frecuencias simulado ha sido desde  $0 \text{ Hz}$  a  $12 \text{ kHz}$ , con incrementos de  $50 \text{ Hz}$ , que supone un total de  $240$  frecuencias simuladas.

La Figura 3 representa los distintos volúmenes simulados en el análisis armónico, que son: la membrana, la esfera de aire y la fuente de sonido. Se observa la relación entre los tamaños de elementos de los distintos volúmenes.

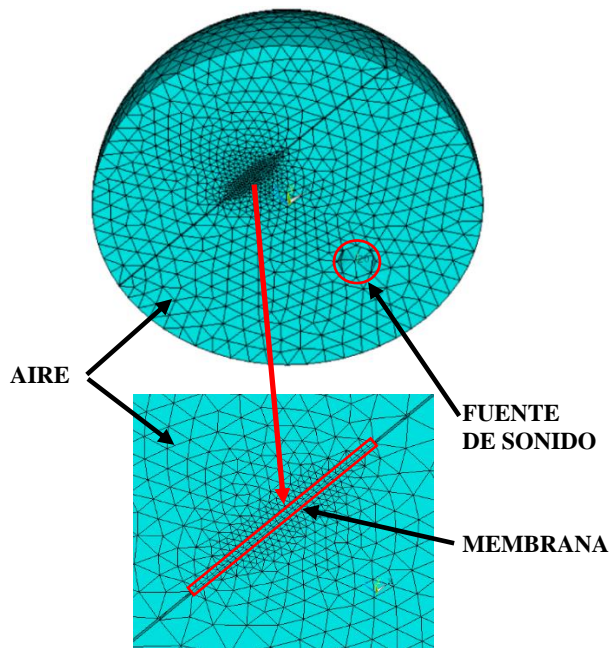


Figura 3. Volúmenes en la simulación.

También se han realizado análisis modales a las distintas geometrías de las membranas para calcular los modos de vibración y las formas modales. Para este análisis se ha usado el tipo de elemento SHELL181, para conseguir una convergencia más rápida, y un tamaño de elemento relacionado con el radio de la membrana,  $\text{radio}/160$ . Según estudios previos [9], es un tamaño de elemento adecuado para el cálculo.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el análisis modal realizado a las membranas de  $40$  y  $60 \text{ }\mu\text{m}$ , las siguientes nueve primeras frecuencias naturales obtenidas están dadas en la Tabla 1:

Tabla 1. Nueve primeros modos de vibración para las membranas de  $40$  y  $60 \text{ }\mu\text{m}$ .

Espesor	$40 \text{ }\mu\text{m}$	$60 \text{ }\mu\text{m}$
Modo 1 (Hz)	1039.2	1555.5
Modo 2 (Hz)	2164.1	3238.2
Modo 3 (Hz)	3557.4	5317.9
Modo 4 (Hz)	4052.2	6061.1
Modo 5 (Hz)	5211.6	7784.7
Modo 6 (Hz)	6200.9	9273.6
Modo 7 (Hz)	7121.8	10632
Modo 8 (Hz)	8640.8	12912
Modo 9 (Hz)	9103.7	13600

En la Figura 4 se han representado las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) en desplazamiento respecto a la presión que se aplica en la fuente de sonido, para el centro de las membranas de  $40$  y  $60 \text{ }\mu\text{m}$  de espesor, respecto a la frecuencia, con una distancia ' $d$ ' de  $1 \text{ cm}$ , un ángulo ' $\alpha$ ' de  $90^\circ$ , una presión de la fuente de  $1 \text{ Pa}$  y un amortiguamiento del  $1\%$ .

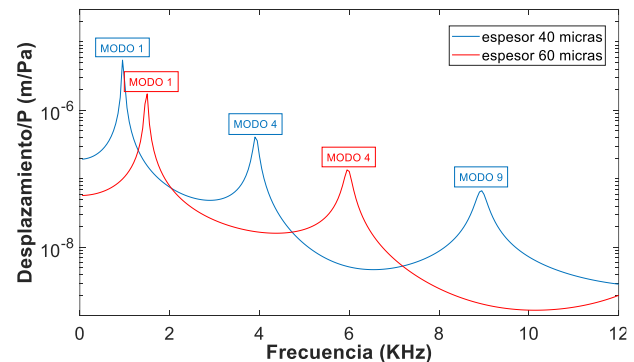
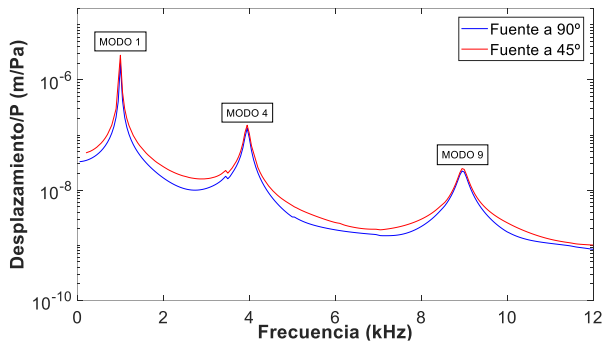


Figura 4. Desplazamiento del centro de la membrana de  $40 \text{ }\mu\text{m}$  (azul) y  $60 \text{ }\mu\text{m}$  (rojo) de espesor,  $d=1 \text{ cm}$ ,  $\alpha=90^\circ$ , presión en la fuente de  $1 \text{ Pa}$  y amortiguamiento del  $1\%$ .

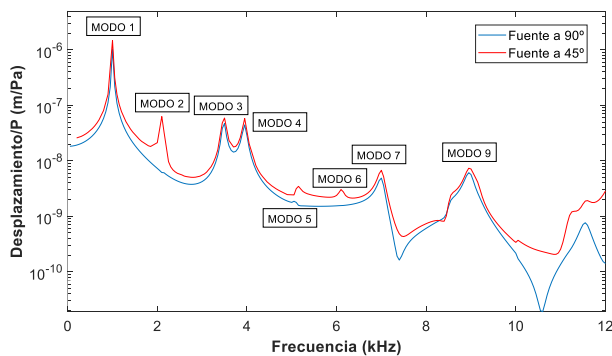
En esta figura se observa que aparecen en las respuestas de las membranas las frecuencias naturales 1, 4 y 9, que son las que presentan simetría axial.

También se han graficado en la Figura 5 las FRF en desplazamiento del centro de la membrana de 40  $\mu\text{m}$ , una presión en la fuente de 1 Pa, un amortiguamiento del 1%, con la fuente de sonido a una distancia de 5 cm, y con ángulos de 90° y 45°. En la figura se observa que los modos presentes son los de simetría axial.



**Figura 5.** Desplazamiento del centro de la membrana de 40  $\mu\text{m}$  de espesor,  $d=5$  cm, presión en la fuente de 1 Pa, amortiguamiento del 1% y ángulos  $\alpha=90^\circ$  (azul) y  $\alpha=45^\circ$  (rojo).

En la Figura 6 se han graficado los mismos casos que para la Figura 5, pero en vez del centro de la membrana se ha tomado el punto de coordenadas  $y=0$  y  $x=\text{radio}/2$ .

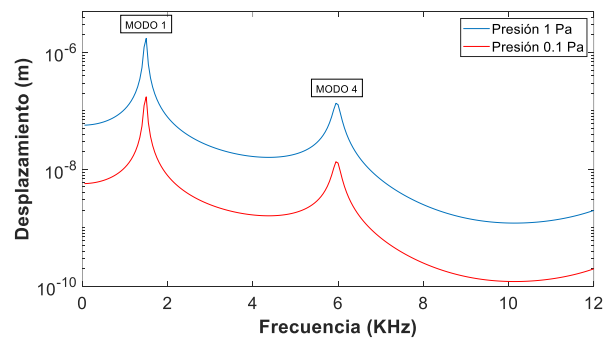


**Figura 6.** Desplazamiento del punto de coordenadas  $y=0$ ,  $x=\text{radio}/2$  de la membrana de 40  $\mu\text{m}$  de espesor,  $d=5$  cm, presión en la fuente de 1 Pa, amortiguamiento del 1% y ángulos  $\alpha=90^\circ$  (azul) y  $\alpha=45^\circ$  (rojo).

En la figura anterior se observa que aparecen en la respuesta de la membrana más modos de vibración que en los casos anteriores. Aparecen más para la fuente de sonido a 45°. Se puede concluir que mientras menos simetría en la configuración del ensayo, más modos se pueden localizar.

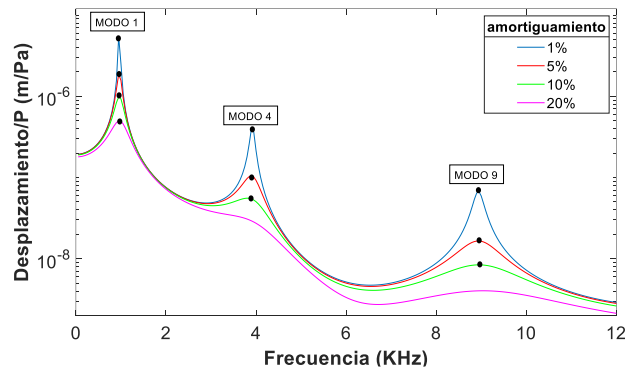
También se han graficado en la Figura 7 el desplazamiento del centro de la membrana de 60  $\mu\text{m}$ ,  $d=1$  cm,  $\alpha=90^\circ$ , amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido

de 1 Pa y 0.1 Pa. Como era de esperar, las respuestas son similares, con diferente amplitud.



**Figura 7.** Desplazamiento del centro de la membrana de 60  $\mu\text{m}$  de espesor,  $d=1$  cm,  $\alpha=90^\circ$ , amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido de 1 Pa (azul) y 0.1 Pa (rojo).

Por último, se han representado en la Figura 8 la respuesta en desplazamiento de la membrana de 40  $\mu\text{m}$  de espesor,  $d=1$  cm,  $\alpha=90^\circ$ , amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido de 1 Pa, para diferentes amortiguamientos en la membrana: 1%, 5%, 10% y 20%.



**Figura 8.** Desplazamiento del centro de la membrana de 40  $\mu\text{m}$  de espesor,  $d=1$  cm,  $\alpha=90^\circ$ , presión en la fuente de sonido de 1 Pa y amortiguamientos: 1% (azul), 5% (rojo), 10% (verde), 20% (magenta).

En esta figura se observa que los picos de la respuesta, que corresponden con los modos de vibración, se suavizan, como era de esperar. Pero otro fenómeno que ocurre, y que a priori no era conocido, es que los picos se desplazan hacia la derecha al aumentar el amortiguamiento.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un estudio numérico para determinar los distintos parámetros que pueden influir en la respuesta dinámica de una membrana. Los parámetros estudiados han sido la distancia 'd' al centro de la membrana, el ángulo ' $\alpha$ ' entre la fuente y el plano de la misma, la presión

de la fuente de sonido, los puntos de medida y el amortiguamiento de la membrana. En los resultados obtenidos se observa que los modos de vibración presentes en la respuesta son diferentes en función de los parámetros seleccionados.

Es muy importante un estudio previo de los parámetros estudiados (distancia de la fuente de sonido y disposición, presión de la fuente, puntos de medida...) que pueden alterar los resultados obtenidos en el ensayo.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad de Málaga por la financiación recibida.

## 8. REFERENCIAS

- [1]. Suzuki, H.; Yamaguchi, N.; Izumi, H. Theoretical and experimental studies on the resonance frequencies of a stretched circular plate: Application to Japanese drum diaphragms. *Acoust. Sci. Technol.* **2009**, *30*, 348–354, doi:10.1250/ast.30.348.
- [2]. Lee, J.; Wang, Z.; He, K.; Shan, J.; Feng, P.X.L. High frequency MoS<sub>2</sub> nanomechanical resonators. *ACS Nano* **2013**, *7*, 6086–6091, doi:10.1021/nn4018872.
- [3]. Caminos, L.; Garcia-Manrique, J.; Lima-Rodriguez, A.; Gonzalez-Herrera, A. Analysis of the mechanical properties of the human tympanic membrane and its influence on the dynamic behaviour of the human hearing system. *Appl. Bionics Biomech.* **2018**, *2018*, doi:10.1155/2018/1736957.
- [4]. Kirikae, I. *The Structure and Function of Middle Ear*; Tokio University Press, 1960;
- [5]. Lima-Rodriguez, A.; Gonzalez-Herrera, A.; Garcia-Manrique, J. Study of the dynamic behaviour of circular membranes with low tension. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, doi:10.3390/app9214716.
- [6]. Gonzalez-Herrera, A.; Tao Cheng, J.; Rosowski, J.J. 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 Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015; 2015.
- [7]. Lima-Rodriguez, A.; Garcia-Manrique, J.; Dong, W.; Gonzalez-Herrera, A. A Novel Methodology to Obtain the Mechanical Properties of Membranes by Means of Dynamic Tests. *Membr.* **2022**, *12*.
- [8]. Timoshenko, S. *Vibration problems in engineering*; New York, 1928;
- [9]. Gonzalez-Herrera, A.; Olson, E.S. A study of sound transmission in an abstract middle ear using physical and finite element models. *J. Acoust. Soc. Am.* **2015**, *138*, 2972–2985, doi:10.1121/1.4934515.