

ESTUDIO DE EFECTOS DE ASIMETRÍA EN VIBRADORES ULTRASÓNICOS AXISIMÉTRICOS

D. Chacón, G. Rodríguez, E. Riera y J. A. Gallego.

Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid, España dchacon@ia.cetef.csic.es

RESUMEN: El uso de transductores ultrasónicos de potencia del tipo placa vibrante, plantea una serie de problemas relacionados con el posible acoplamiento o interacción entre los diversos modos de vibración que contiene el sistema. En estos transductores el radiador está constituido por una placa vibrante de geometría circular y perfil escalonado. Esta placa se pone en vibración mediante un excitador piezoeléctrico sintonizado a la frecuencia del modo de vibración de interés. La placa radiante se excita sinusoidalmente en su centro generando un modo de vibración axisimétrico. Las figuras nodales que se forman son círculos concéntricos. Sin embargo, en muchos casos aparecen asimetrías en el modo de vibración, de forma que las figuras nodales aparecen deformadas en forma de óvalos. Este fenómeno, que se repite con determinada frecuencia, puede ser debido fundamentalmente a dos causas: la influencia de modos cercanos no axisimétricos o a la anisotropía del material.

En este trabajo se estudian y analizan ambas posibilidades empleando tanto técnicas de simulación numérica por elementos finitos como medidas experimentales.

ABSTRACT: The use of high-power ultrasonic plate transducers shows a series of problems related with the presence of modal coupling or interactions between the vibrational modes of the ultrasonic system. In such system, the radiator consists of a stepped circular plate. The radiator plate is driven at its centre by a tuned piezoelectric vibrator generating an axisymmetric mode of vibration. Nevertheless, in many cases the nodal figures are deformed and present ovals instead of circles in the plate. This phenomenon which is frequently observed can be basically due to two many reasons: the material anisotropy and the influence of the high-density of non-axisymmetrical modes around the operating frequency.

This paper deals with the study and analysis of both possibilities using numerical simulations by finite element techniques and experimental measurements.

1.-INTRODUCCIÓN

Teóricamente, excitando una placa circular de un material metálico isotrópico en su centro se obtienen modos de vibración axisimétricos circulares [1]. Sin embargo en la práctica las placas circulares excitadas en sus modos de vibración axisimétricos presentan óvalos en lugar de círculos. Dos posibles causas se han planteado y analizado en este trabajo: la anisotropía del material y el efecto de la interferencia de modos diametrales potencialmente contenidos en la placa y cercanos en frecuencia con el modo de n-círculos nodales. Para ello se ha llevado a cabo el estudio de la influencia del material procedente de diversos fabricantes con el fin de validarlo antes de su mecanizado. Para esta validación se propone un método sencillo que combina el empleo del modelado numérico de la placa por elementos finitos y la observación experimental de la forma de vibración, con el fin de cuantificar la inhomogeneidad del material y su efecto sobre la forma de vibración en modos resonantes axisimétricos altos. Se ha trabajado con cuatro muestras procedentes de diversos fabricantes.

El primer paso para el estudio de los óvalos ha consistido en excitar un modo de vibración axisimétrico de la muestra. Este modo debe ser acorde con la geometría con la que el fabricante sirve el material (en forma de disco), por lo que se ha excitado un modo axisimétrico en el que aparecen varios círculos nodales concéntricos, con el punto de máximo desplazamiento situado en el centro de la muestra, lugar que se pone en vibración utilizando una cerámica piezoeléctrica. La cerámica es excitada utilizando un generador de señal y un amplificador acoplado a un osciloscopio (ver Figura 1). La sintonización del modo de vibración se lleva a cabo electrónicamente y se observa espolvoreando virutas de esmeril sobre la superficie del material para ver la figura de vibración formada. El registro de la forma de vibración se lleva a cabo mediante el empleo de un vibrómetro láser.

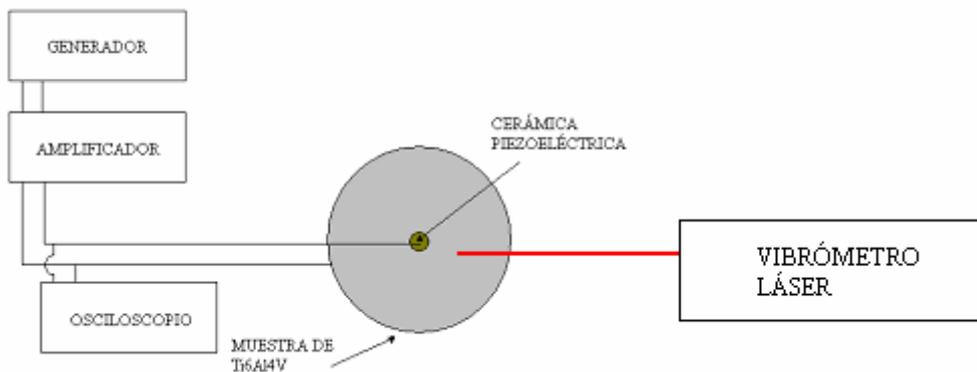


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental.

Para predecir la formación de las figuras de vibración que se quiere estudiar se realiza un análisis modal de las muestras empleando el código por elementos finitos ANSYS®. Se obtienen las frecuencias y formas de vibración de los modos propios. Las propiedades físicas del material se suponen inicialmente isotrópicas.

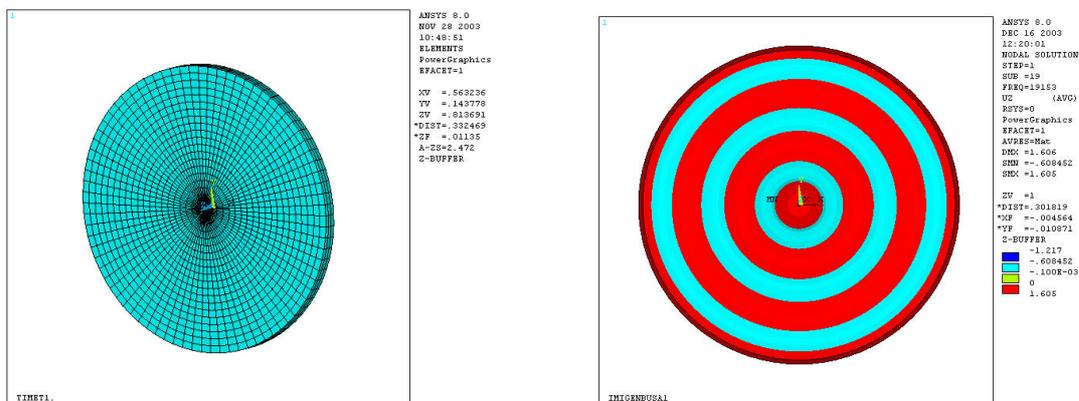


Figura 2. Detalle del mallado tridimensional (izqda.) y de la forma de vibración obtenida mediante técnicas por elementos finitos (dcha.) en la muestra 4

Una vez realizado el análisis modal se seleccionan aquellos modos que nos interesan (axisimétricos) y que podremos excitar posteriormente en las placas muestra. En la Figura 2 se puede apreciar el detalle del mallado de una las muestras y el modo de vibración calculado. La vibración real se observa en la Figura 3 donde se aprecia que el círculo nodal central aparece claramente ovalado. La deformación va disminuyendo según nos alejamos del punto de excitación, de tal forma que los círculos mas alejados apenas están afectados. En la Tabla 1 se presentan los datos de las dimensiones de las muestras junto con los datos de las frecuencias numérica y experimental para los modos con varios círculos nodales.



Figura 3. Figura de vibración obtenida experimentalmente. El óvalo central aparece claramente marcado.

Tabla 1.- Dimensiones de las muestras y, frecuencias tanto numéricas como experimentales de los modos estudiados.

Muestra	Diámetro (mm.)	Espesor (mm.)	Círculos nodales	F _{Num.} (Hz)	F _{Exp} (Hz)	Diferencia (%)
1	486	22.7	5	18118	17920	1.2
2	486	22.7	5	18118	17910	1.2
3	400	31	3	13094	12910	1.4
4	486	15.5	6	19111	18920	1.0

2.-ESTUDIO DE LA ANISOTROPÍA MEDIANTE TÉCNICAS FEM

De lo que se trata ahora es de modelar la anisotropía elástica del material empleando técnicas de elementos finitos. Todas las muestras analizadas que presentaban óvalos tenían una orientación clara, por lo que cabe pensar que lo que tenemos realmente es un material con una cierta anisotropía según una determinada dirección.

La anisotropía elástica de un material podemos introducirla en el problema marcando los valores del módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν) y módulo de cizalladura (G) en cada uno de los ejes del espacio.

Se utilizaron las geometrías de las diferentes muestras para la realización del modelo y se estudiaron las frecuencias y modos de vibración variando E en cada una de las tres

direcciones del espacio (E_X , E_Y , E_Z), suponiendo G y ν constantes. Los ejes X e Y se eligen contenidos en el plano de la placa.

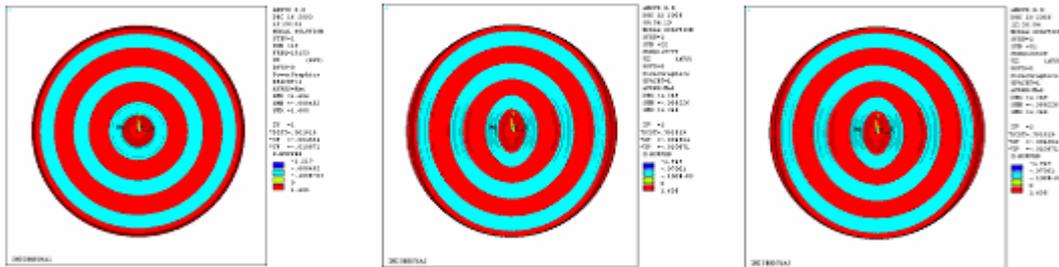


Figura 4. Cálculo numérico de la forma de vibración con 6 círculos nodales para una muestra n°4 supuesta isotrópica (izqda.). Cálculo para un aumento del 10% en E en uno de los ejes del plano de la muestra (centro) y para un aumento del 5% en el mismo eje (dcha.)

Tabla 2. Valores numéricos y experimentales de las longitudes de los ejes mayor y menor de los óvalos observados para un aumento de E del 10% en uno de los ejes que contienen la muestra.

Óvalo Nodal	Eje mayor Numérico (mm.)	Eje mayor Experimental (mm.)	Diferencia (%)	Eje menor Numérico (mm)	Eje menor Experimental (mm)	Diferencia (%)
1	102	75	26	63	50	21
2	165	145	12	123	140	12
3	241	220	9	233	218	6
4	313	305	3	296	305	3
5	393	385	2	393	385	2
6	461	460	0	448	460	3

Tabla 3. Valores numéricos y experimentales de las longitudes de los ejes mayor y menor de los óvalos observados para un aumento de E del 5% en uno de los ejes que contienen la muestra.

Óvalo Nodal	Eje mayor Numérico (mm.)	Eje mayor Experimental (mm.)	Diferencia (%)	Eje menor Numérico (mm.)	Eje menor Experimental (mm.)	Diferencia (%)
1	102	75	26	63	50	21
2	167	145	13	126	140	10
3	241	220	9	233	218	6
4	313	305	3	296	305	3
5	393	385	2	393	385	2
6	461	460	0	448	460	3

En las Tablas 2 y 3 se presentan los valores del eje mayor y menor de los óvalos observados experimentalmente para la muestra 4 para dos valores de anisotropía del 10% y del 5%, respectivamente (Figura 4). Como se puede ver, los resultados numéricos se ajustan a los valores experimentales. Las diferencias entre los valores de los semiejes de los óvalos son menores según nos alejamos del lugar de la excitación con una precisión menor del 10% excepto para el primer círculo donde se aprecian diferencias del orden del 20%. Los óvalos aparecen mucho más marcados en el centro de las muestras y menos según nos vamos alejando de este. Por otro lado, para un mismo nivel de anisotropía los óvalos centrales aparecen mas marcados para las muestras más delgadas, algo que también se corresponde con las observaciones experimentales. Se podría pensar entonces que los diferentes espesores o diámetros de las muestras podrían influir en la deformación de los círculos nodales. Para salir de dudas se realizó un análisis de los óvalos en los tres casos con 5 círculos nodales y espesores distintos para un mismo nivel de anisotropía. Por los gráficos mostrados en la Figura 5 parece que el espesor no es un factor determinante, sino que seguramente el proceso de fabricación introduce mayor anisotropía en las muestras más delgadas. Hay que hacer notar que también se hizo un análisis variando el valor de E_z respecto de E_y y E_x , sin encontrar ninguna deformación de los círculos.

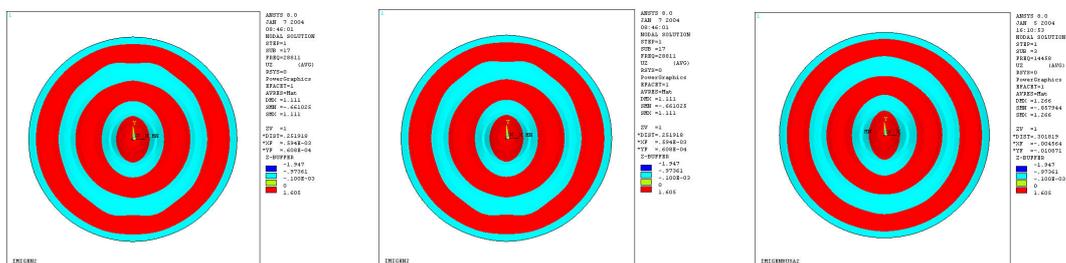


Figura 5. De izquierda a derecha, forma de los óvalos para un mismo valor de E y el mismo número de círculos nodales para la muestras 1,3 y 4

Las diferencias encontradas entre los valores numéricos y experimentales en los dos primeros óvalos no pueden ser totalmente explicados mediante la anisotropía del material ya que se mantiene un desajuste apreciable a pesar del valor del módulo de Young que pongamos en los ejes de coordenadas. A su vez según nos alejamos del punto de excitación, los óvalos se van pareciendo más a círculos hasta el punto en que los óvalos mas alejados caen en las posiciones teóricas de los círculos estudiados para el modo de vibración puro de las muestras. Cabe suponer, sin embargo, que la excitación realizada en el centro de la placa tiene influencia sobre el primer círculo nodal que en la simulación numérica no se contempla.

3.-ESTUDIO DE LOS ÓVALOS POR INTERFERENCIA DE MODOS DIAMETRALES CERCANOS

Vázquez [4] realizó un primer estudio de la interferencia de modos cercanos en placas vibrantes. Este trabajo consistió en un análisis por elementos finitos de placas radiantes circulares escalonadas vibrando en sus modos axisimétricos. Se estudió la interferencia de modos diametrales cercanos en frecuencia al modo de trabajo y se justificó la aparición de los óvalos nodales en las placas circulares por la interferencia con otro modo de un diámetro.

Para el análisis que se llevó a cabo en ese trabajo se utilizó la muestra 1 empleando elementos en 2D. A continuación se llevó a cabo un análisis modal para extraer las frecuencias de los modos axisimétricos de vibración, encontrando los siguientes valores de las frecuencias:

$$f_1 = 17734 \text{ Hz. } f_2 = \mathbf{18118 \text{ Hz.}} \quad f_3 = 19153 \text{ Hz. } f_4 = 24158 \text{ Hz.}$$

siendo f_2 la frecuencia en la que aparece el modo de 5 círculos nodales con el que hemos estado trabajando. Seguidamente se estudiaron los modos de vibración de las familias de modos con círculos nodales mas uno, dos y tres diámetros nodales obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Frecuencia de modos de vibración axisimétricos con 0, 1, 2 y 3 diámetros.

Nº diámetros	f_1	f_2	f_3	f_4
0	17734	18118	19153	24158
1	15181	20961	21044	24531
2	16089	17892	18509	23956
3	19038	20614	22640	

Se observa que no hay ningún modo de un diámetro que esté cerca de la frecuencia de resonancia del modo de 5 círculos nodales, por lo que no se podrían explicar los óvalos debido a una interferencia de un modo de un diámetro sobre el modo de varios círculos, a menos que lo que esté ocurriendo sea que los modos de dos diámetros estén interfiriendo con el de trabajo. El posible modo de cuatro círculos nodales mas dos diámetros que podría estar interfiriendo es el de 17892 Hz. Este modo ya apareció cuando se hizo el análisis del material en 3-D y efectivamente, se trata de una superposición de dos diámetros con círculos ovalados tales como los que se ven en la Figura 6.

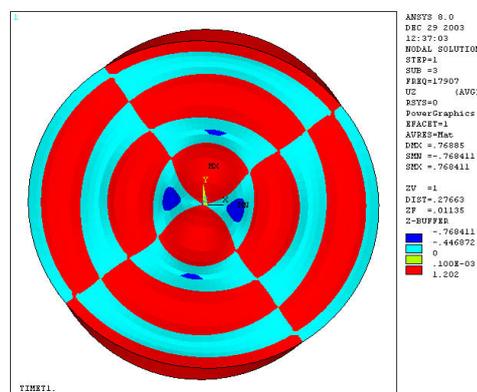


Figura 6. Forma de vibración para el modo de 2 diámetros y 4 círculos nodales a una frecuencia de 17892 Hz.

Este análisis también se realizó para las muestras 4 y 2 obteniéndose resultados parecidos, encontrando para la muestra 4 un modo de 5 círculos nodales y 2 diámetros a una frecuencia de 18971 Hz, mientras que la frecuencia de interés del modo con 6 círculos nodales era de 19111 Hz. Para la muestra 2, se tiene el mismo caso, un modo de dos círculos nodales y dos diámetros a una frecuencia de 12646 Hz, mientras que la frecuencia del modo con 3 círculos nodales es de 13095 Hz. En la Tabla 5 se presentan los valores de las frecuencias obtenidas. Conviene hacer notar que todos los modos cercanos de dos diámetros están compuestos por dos diámetros y $n-1$ círculos nodales, siendo n el número de círculos nodales de cada muestra. Todos estos resultados concuerdan perfectamente con los datos teóricos aportados en [2] y [3].

Tabla 5. Frecuencias teóricas del modo axisimétrico de n círculos nodales y del modo cercano de $(n-1)$ círculos nodales y dos diámetros

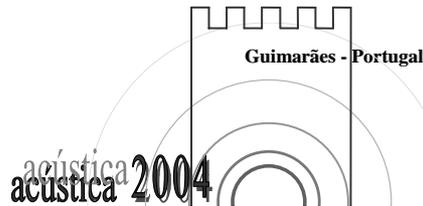
Muestra	Frecuencia del modo de n círculos nodales (Hz)	Frecuencia del modo de $(n-1)$ círculos nodales + 2 diámetros (Hz)	ΔF (Hz)
1	18118	17892	226
2	18118	17892	226
3	13095	12646	449
4	19111	18971	140

Los datos teóricos hacen pensar que este modo de $(n-1)$ círculos nodales y 2 diámetros puede ser el causante de la formación de los óvalos ya que como se puede ver en la Tabla 5, las muestras que presentan los óvalos mas deformados son las que tienen el modo de 2 diámetros a una frecuencia mas cercana, entre 100 y 200 Hz.

Seguidamente se estudió mediante ANSYS[®] la influencia de los modos cercanos a la frecuencia de trabajo en las muestras número 1 y 2, suponiendo que la forma de la “campana de resonancia” del modo que interfiere es parecida a la del modo de trabajo, aunque como se ha indicado anteriormente, están desplazadas en frecuencia. No se obtuvieron resultados concluyentes para la frecuencia de vibración del modo de 5 círculos nodales la influencia del modo de dos diámetros es prácticamente nula ya que la amplitud de los desplazamientos está tres órdenes de magnitud por debajo. Esto mismo sucede también para frecuencias intermedias entre la de 5 círculos nodales y la de dos diámetros con 4 círculos, sin poder establecer un patrón de desplazamientos que genere de manera natural los óvalos. Por lo tanto tampoco se tendría una explicación para el problema. Finalmente en el caso en que los valores de los desplazamientos fueran comparables, la figura que se formaría sería la de un trébol de cuatro hojas y no la de un óvalo.

4.-CONCLUSIONES

El análisis numérico llevado a cabo por ANSYS[®] indica que hay un efecto de la anisotropía elástica del material en una dirección, ya que aparecen los óvalos. El óvalo central es más



marcado que el resto, cosa que se puede contrastar con la realidad. La cuantificación de la anisotropía se ha realizado manteniendo diferencias entre los valores numéricos y experimentales del orden del 20% con pocas variaciones, con lo que cabe pensar que hay algo más que provoca esta deformidad en los óvalos. La excitación puede jugar un papel importante a este respecto.

Por otro lado se podría descartar la interferencia de los modos cercanos al de trabajo debido a que no se han encontrado modos de un diámetro a una frecuencia suficientemente cercana a la del modo axisimétrico de círculos de las muestras de material. El modo de varios círculos nodales con un diámetro podría justificar la presencia de los óvalos. Sin embargo los únicos modos que por su cercanía en frecuencia podrían interferir son los de dos diámetros anteriormente expuestos y en el caso de que interfirieran, la figura que formarían sería la de un trébol de cuatro hojas y no un óvalo.

Como consecuencia del estudio numérico-experimental realizado y con el fin de profundizar en el problema de la interferencia de modos se llevarán a cabo ulteriores estudios aumentando el número de datos experimentales.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con cargo al Proyecto del Plan Nacional de Investigación DPI 2002-3409. Con este trabajo se quiere también rendir homenaje póstumo a nuestro compañero y amigo Fernando Vázquez recientemente desaparecido.

REFERENCIAS

- [1] S. P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, Mc. Graw-Hill, New York, 1959.
- [2] A. W. Leissa, *Vibration of Plates*, Ohio State University, NASA SP-160, 1969
- [3] T. D. Rossing, *Principles of Vibration and Sound*, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [4] F. Vázquez, *Estudio por elementos finitos de interferencia de modos diametrales en placas circulares resonando en modos axisimétricos*, (pendiente de publicación).