

## Porosidad en transductores piezoeléctricos de película gruesa

Gwirc, S.<sup>(i)</sup>; Negreira C.<sup>(ii)</sup>

<sup>(i)</sup>INTI- Electrónica e Informática

<sup>(ii)</sup>Instituto de Física, Facultad de Ciencias – LAU - Uruguay

### Introducción

En trabajos anteriores se ha presentado el funcionamiento, y algunas características, de los transductores piezoeléctricos de ultrasonido, fabricados mediante serigrafía con tecnología de película gruesa[1][2]. Su alta eficiencia en aplicaciones de ensayos no destructivos e imágenes de diagnóstico médico, está basada en ciertas diferencias que se producen en la película gruesa con respecto a una cerámica tradicional fabricada con el mismo material básico, mediante alta presión y temperatura.

El diseño de transductores y otros componentes como MEMs (micro-electro-mecanismos) para aplicaciones industriales, es bastante complicado y aún cuando se utilice un programa de elementos finitos se requiere el conocimiento detallado de muchas características del material PZT, como las constantes piezoeléctricas, mecánicas y acústicas, o la combinación de varias de ellas para desarrollar un determinado dispositivo.

Los trabajos iniciales de Bowen et al.[3] y Gouverneur et al.[4] muestran que la técnica llamada "doctor blade" o la aplicación de presión hidrostática luego de la serigrafía logran una alta densificación de la película (95% de la teórica) a temperaturas estándar de sinterizado (850-950°C), por lo que sus características se acercan a la cerámica obtenida por compresión y sinterizado a alta temperatura (superior a 1200°C). Morten et al.[5] estudiaron algunas propiedades ferroeléctricas de la pintura y su composición, fabricando transductores de torque, presión, aceleración y humedad basados en la misma[6]. White et al.[7] analizaron los efectos de la preparación del polvo para fabricar la pintura, el tipo de adhesivo y las condiciones de polarización, aplicándolo a dispositivos de ondas acústicas superficiales[8].

Estos trabajos evidencian que se obtiene un valor más bajo de las constantes dieléctrica y piezoeléctricas con respecto a la cerámica sinterizada a alta temperatura. A mayor temperatura de sinterizado, en la película obtenida por serigrafía, se produce un proceso de densificación que tiende a mejorar sus características,

pero a partir de los 950 °C aproximadamente, ocurre la pérdida de PbO [9] con el consiguiente empeoramiento de las propiedades piezoeléctricas.

No obstante, la realización de los dispositivos anteriores aporta poca información sobre las características fundamentales del PZT depositado por serigrafía y su funcionamiento en la emisión y recepción de ondas ultrasónicas, así como las consideraciones a tener en cuenta en el diseño de los mismos[10][11], principalmente la porosidad

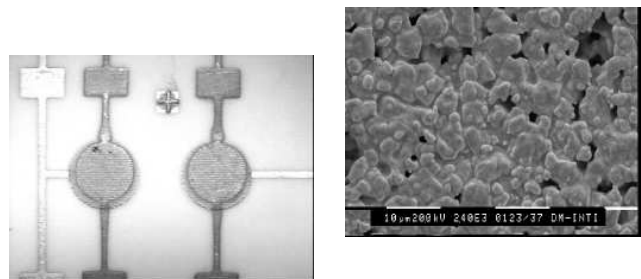


Fig. 1: Transductores (a la izquierda) y su microestructura porosa (a la derecha) obtenida con MEB.

Presentamos en este trabajo un método de cálculo de las constantes elásticas y eléctricas de una cerámica piezoeléctrica porosa, típica de la tecnología de película gruesa, a partir de la hoja de datos del material de base. Se informa los valores encontrados para un caso particular, comparándolos con los resultados encontrados experimentalmente. Como comprobación, los valores hallados se utilizan en la simulación del comportamiento vibratorio de un disco de PZT poroso sobre un sustrato de alúmina, utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF).

### Metodología

Se preparó una pintura utilizando como base un polvo cerámico comercial fabricado por Ferroperm Ltd., identificado como PZ27. Las características de esta pintura, una vez sinterizada sobre alúmina, fueron medidas directamente o calculadas a partir de un modelo electromecánico utilizando la curva de

impedancia. Estos datos se detallan en la Tabla I, en la que también se comparan con los valores de la hoja de datos del fabricante de la cerámica tradicional.

Tabla I. Características Comparativas.

Propiedad	Unidades	PZ27	PZ27+PG
Densidad	(10 <sup>3</sup> ) kg/m <sup>3</sup>	7,7	6,2
Cte. Dieléctrica $K_{33}^T$	$\epsilon/\epsilon_0$	1800	350 - 450
Cte. de Carga $d_{33}$	(10 <sup>-12</sup> ) C/N	425	106
Acoplamiento EM $k_t$	-	0,47	0,31
Veloc. Sonido $V_{\square}$	m/s	3900	2650
tang $\delta$	-	0.017	0.06
Impedancia Acústica	Mryals	~30	~16
$Q_M$	-	80	30 - 40

Una dificultad importante para utilizar estos datos como base para el diseño de componentes, radica en que la mayoría tiene incorporado la geometría y el hecho de que la película está adherida a un sustrato, por lo que no responden al material libre y no pueden usarse directamente en la simulación con elementos finitos, por ejemplo.

Para analizar esta estructura con poros y su influencia en las propiedades mecánicas y piezoeléctricas de la película de PZT tomamos como referencia el modelo de cubos modificado propuesto por H. Banno[12][13], aplicado a cerámicas piezoeléctricas con poros cerrados. En este modelo consideramos a la película como un compuesto piezoeléctrico del tipo 0-3 formado por cubos superpuestos y se incluye una constante  $L_s$  que da cuenta de la forma de los poros y su distribución en la matriz cerámica. Suponemos los poros esféricos o la forma de los mismos está orientada aleatoriamente en las tres direcciones. Su distribución es homogénea dentro de la película piezoeléctrica de modo que  $L_s=1$ . Se asume también que el material, desde el punto de vista elástico, es isotrópico y que tanto el módulo de Young (E) como el cociente de Poisson ( $\sigma$ ) de los poros son cero. La fracción en volumen de poros P se estima a partir de la densidad medida de la película, definida como.

$$P = \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0}$$

## Resultados

La constante dieléctrica de la cerámica porosa se puede calcular a partir del valor de la cerámica no porosa como:

$$\bar{K}_{33}^T = K_{33}^T \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P}{L_s} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{P^{\frac{2}{3}}}{\left[ P^{\frac{1}{3}} \cdot (K_{33}^T - 1) \cdot L_s^{\frac{2}{3}} + 1 \right] \cdot L_s^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (1)$$

El cociente de Poisson ( $\sigma$ ) viene dado por:

$$\bar{\sigma} = \sigma \cdot \left( 1 - P^{2/3} \cdot L_s^{1/3} \right) \quad (2)$$

De la misma manera las constantes elásticas verifican las siguientes relaciones:

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cdot \left[ 1 - P^{2/3} \cdot L_s^{1/3} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\bar{S}_{33} = S_{33} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P}{L_s} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores, las constantes con la barra superior representan las correspondientes al material poroso.

De manera similar se pueden hallar las constantes piezoeléctricas de carga y calcular también las constante de acoplamiento electromecánico, la que nos da una idea de la eficiencia del transductor para convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Los valores encontrados para esos parámetros se ven en la Tabla II.

Tabla II. Datos comparativos de los parámetros elásticos y piezoeléctricos en cerámicas porosas y no porosas.

	PZ27	TF-PZ27
$S_{11} \cdot 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /N)	17	25
$S_{33} \cdot 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /N)	23	34
$d_{31} \cdot 10^{-12}$ (C/N)	-170	-134
$d_{33} \cdot 10^{-12}$ (C/N)	425	297
$k_{33}$	.59	.54
$\sigma$	.39	.26

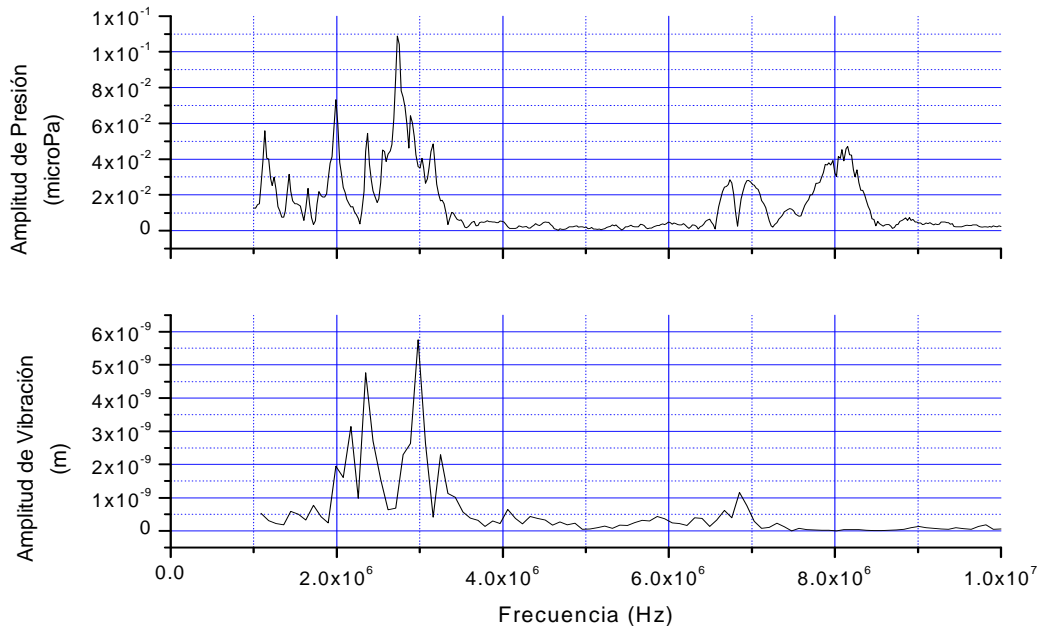
El cálculo de la constante dieléctrica requiere un comentario particular. Aún teniendo en cuenta que la pintura contiene una pequeña cantidad de vidrio para mejorar la estabilidad mecánica de la misma, la constante dieléctrica relativa que se encuentra

con este modelo es  $\bar{K}_{33}^T \approx 1000$ . Este valor está bastante alejado del valor medido que figura en la Tabla I, pero tenemos que tener en cuenta que esta medición se realiza con la película adherida al sustrato. Por otra parte, este valor se ve influenciado por la distribución de poros en la película. La distribución de poros pierde homogeneidad al pintar capas superpuestas para lograr el espesor deseado ya que se aplican sobre una superficie porosa, la capa anterior, que absorbe el vehículo y dificulta la homogeneización durante el sacado. Si adjudicamos a  $L_s$  un valor de 0,75 en lugar de la unidad que utilizamos hasta ahora, es suficiente para dar cuenta de la diferencia. La constante dieléctrica es el parámetro más sensible a la forma y distribución de los poros, y se estudian mejoras en la preparación de la

pintura para aumentar el valor de esa constante. Ahora podemos calcular el valor de este parámetro para un disco delgado de PZT, impedido de moverse en la dirección radial debido a que está firmemente adherido al substrato de alúmina por una de sus caras. Es decir, calculamos la constante  $K_{33}^S$ , que es la medida realmente en la Tabla I, y cuya relación con el valor calculado en (1) es la siguiente:

$$\overline{K}_{33}^S \cong (1 - \overline{k}_{33}^2) \cdot \overline{K}_{33}^T \approx 400 \quad (5)$$

vibratoria, utilizando una simulación con MEF, del desplazamiento de un disco de PZT al variar la frecuencia de vibración. Se comparó esta respuesta con la de un hidrófono que responde a la presión que genera el disco (ver Fig. 2). Como se puede ver, la simulación reproduce bien las principales características de la medición a baja frecuencia, con un pequeño desplazamiento en la posición de los máximos. A alta frecuencia no reproduce el pico de 8 MHz. Estas diferencias se deben principalmente a que se utilizó un modelo simple de disco PZT sobre un substrato, que no



Este número nos acerca más a los valores medidos experimentalmente de la Tabla I. El resto de las constantes piezoeléctricas y de acoplamiento se calculan de la manera usual<sup>[11]</sup>. Con los parámetros hallados se encontró la respuesta

incluye las variaciones reales de la geometría de la muestra. Además se requiere un ajuste fino en los parámetros elásticos y piezoeléctricos en el MEF.

Fig. 2: Comparación entre la respuesta vibratoria medida con hidrófono (arriba) y la amplitud simulada con ANSYS (abajo)

## Conclusiones

Se ha demostrado que la porosidad de la película es la principal responsable de que tenga diferentes características que el PZT tradicional. El método de cálculo de las constantes de un cerámico de película gruesa a partir de su porosidad permite el diseño y la optimización de variados componentes que hasta ahora debían hacerse a través de sucesivos ensayos. El control de la porosidad permitirá variar las características de la película y utilizarla para seleccionar las más adecuadas para un diseño determinado.

## Referencias

[1] S. N. Gwirc, S. Tropea, C. Negreira, N. Perez, F. Montero de Espinosa, "Fabrication and Characterization of Piezoelectric Thick Film Elements and Arrays", Proceedings of the "IEEE International Ultrasonics Symposium", Vol. 2, pp. 1121-1124, Oct. 2000.  
 [2] S. N. Gwirc, M. F. García Morillo, N. Pérez, C. Negreira, "Thick Film PZT Arrays Vibration Modes", Proceedings of the "IEEE International Ultrasonics Symposium", Vol. 2, pp. 1189 -1191, Oct. 2002.  
 [3] L. J. Bowen, T. Shrout, W. A. Schulze, J. V. Biggers, "Piezoelectric Properties of Internally Electroded PZT Multilayers", Ferroelectrics, vol. 27, pp. 59-62, 1980.

[4] S. Gouverneur, C. Lucat, F. Ménil, and J. L. Aucouturier, "New Densification Process of Thick Films", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 16 N° 5, pp. 505-510, 1993.  
 [5] B. Morten, G. De Cicco, A. Gandolfi and C. Tonelli, "Advances in ferroelectric thick-film materials and sensors", Proceedings of 8<sup>th</sup> European Hybrid Microelectronics Conference, Rotterdam, pp. 392-399, 1991.  
 [6] B. Morten, G. De Cicco and M. Prudenziati, "A thick film resonant sensor for humidity measurements", Sensors and Actuators A, vol. 37-38, pp. 337-342, 1993.  
 [7] P. G. Dargie, R.P. Sion, J. K. Atkinson and N. M. White, "An Investigation of the Effect of Binder Type, Concentration and Poling Conditions upon the Characteristics of Screen Printed Piezoelectric Materials, Proceedings of Eurosens XI, The 11<sup>th</sup> European Conference on Solid State Transducers, Warsaw, pp. 1287-1289, 1997.  
 [8] N. M. White and G. R. Leach, "Fabrication of a thick film sensor employing an ultrasonic oscillator", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., vol. 142, No. 3, 1995.  
 [9] H. X. Zhang, A. Uusimaki, S. Leppavuori, P. Karjalainen, "Phase transition revealed by Raman spectroscopy in screen-printed lead zirconate titanate thick films, J. Appl. Phys., vol. 76, pp. 4294-4300, 1994.  
 [10] J. Vechembre, L. Sagalowicz and N. Setter, "Screen Printed PZT Layer-Fabrication and Properties", Ferroelectrics, Vol. 224, pp. 145-152, 1999.  
 [11] G. S. Kino, "Acoustic Waves", Egewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1987.

- 
- [12] H. Banno, "Theoretical Equations for Dielectric and Piezoelectric Properties of Ferroelectric Composites Based on Modified Cubes Model", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 24, Supplement 24-2, pp. 445-447, 1985.
- [13] H. Banno, "Effects of shape and volume fraction of closed pores on dielectric, elastic, and electromechanical properties of dielectric and piezoelectric ceramics", Am. Ceram. Soc. Bull., vol.66, pp.1332-7, 1987.
- [14] V. Walter, P. Delobelle, P. Le Moal, E. Joseph, M. Collet, "A piezo-mechanical characterization of PZT thick films screen-printed on alumina substrate", Sensors and Actuators A, vol. 96, pp. 157-166, 2002.