

## SIMULACION MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE ENSAYOS DE ULTRASONIDO

A. Del Rosso

Laboratorio de Ensayos No Destructivos, Facultad Regional Mendoza, U. T. N.,  
Rodríguez 273, 5500, Mendoza, Argentina

C. García Garino \* +

Instituto Tecnológico Universitario, Universidad Nacional de Cuyo,  
Centro Universitario, Parque Gral. San Martín, 5500, Mendoza, Argentina

### RESUMEN

En este trabajo se discute la simulación de los Ensayo no destructivos basados en la Técnica de Ultrasonidos mediante el Método de Elementos Finitos. Dado que esta es una aplicación poco frecuente del MEF, se reseña la Técnica de Ultrasonido, se discute el planteo Mecánico del Problema, así como su discretización, y se señalan las características distintivas del problema. Además se presentan problemas de aplicación que se comparan cualitativamente con resultados experimentales disponibles.

### ABSTRACT

In this paper the Numerical Simulation of Ultrasonic Non Destructive Testing Systems is discussed. This application is not frequently discussed, consequently, the subject is briefly introduced and its distinctive features are outlined. In the work the Mechanical formulation as well as the Discretization of Problem are given. Finally some applications problems are solved, and a qualitative comparison with experimental results is provided.

### INTRODUCCION

El propósito de este trabajo es estudiar la simulación numérica de ensayos no destructivos basados en la técnica de ultrasonido, mediante el empleo del Método de Elementos Finitos.

La técnica de ultrasonido es uno de los ensayos no destructivos más empleados en la industria para realizar control de calidad. En muchas situaciones complejas, especialmente en presencia de microfisuras, se produce el fenómeno de refracción de ondas, y no resulta sencillo realizar el ensayo correctamente, dado que aparecen ondas espúreas que afectan los resultados del mismo.

Por este motivo es que en los últimos años se ha comenzado a simular computacionalmente el problema; Ludwig y Lord [1-3] han estudiado el mismo utilizando el Método de Elementos Finitos, que se toman como punto de partida para este trabajo, mientras que otros autores en Japón han recurrido a métodos alternativos [4-5].

Desde el punto de vista mecánico el problema es el de la propagación de ondas en un medio elástico. Luego puede aplicarse a la solución del problema cualquier código que resuelva las ecuaciones del movimiento teniendo en cuenta los efectos de inercia.

La señal que debe modelarse es de muy alta frecuencia del orden de 1Mhz, y se debe transportar una onda armónica arbitraria. Dado que la frecuencia es muy alta, deben emplearse mallas muy densas para que el problema discreto sea capaz de contener las frecuencias de la señal de entrada. Además deben emplearse incrementos de tiempos muy pequeños para obtener una exactitud adecuada, por esta razón en el trabajo se

---

Autor con quien se debe mantener la correspondencia  
Investigador visitante del LEND, FRM, U.T.N.

propone integrar las ecuaciones del movimiento semidiscretizadas, mediante un esquema temporal explícito que en este caso es el algoritmo de diferencias centrales, lo cual supone una novedad con respecto a los citados trabajos de Ludwig y Lord [1-3].

Para calibrar el problema, y con el propósito de analizar la influencia de la discretización en la respuesta del problema, se estudia un problema unidimensional con diferentes mallas. Esta experiencia se aplica para simular cualitativamente un ensayo de ultrasonidos.

### DESCRIPCION DEL ENSAYO POR ULTRASONIDOS

La inspección por ultrasonido es uno de los ensayos no destructivos más utilizados en la Industria con el propósito de realizar controles dimensionales, inspeccionar soldaduras, investigar la presencia de microfisuras, etc., y es de aplicación rutinaria en instalaciones complejas como Centrales Nucleares y energéticas, grandes máquinas hidráulicas, tuberías, gasoductos, etc.

El Método consiste en generar una onda elástica en la pieza a ensayar. Esta onda viaja por la misma, y al encontrar una discontinuidad, parte de ella se refleja retornando al elemento que la produjo. Este reflector puede ser una superficie externa de la pieza o un defecto en el interior de la misma. La intensidad de la onda reflejada permite evaluar ciertas características del reflector. Este procedimiento se conoce como ensayo de pulso-eco. Otra alternativa es el denominado ensayo por transmisión, en donde se emplean dos transductores, uno como emisor, y otro como receptor.

La generación de la onda ultrasónica es provista por un transductor que consiste en un cristal piezoeléctrico, que es excitado adecuadamente por un generador de pulsos, el eco es recibido por el mismo transductor el cual lo convierte en una señal eléctrica con la que se obtiene un oscilograma en la pantalla del equipo.

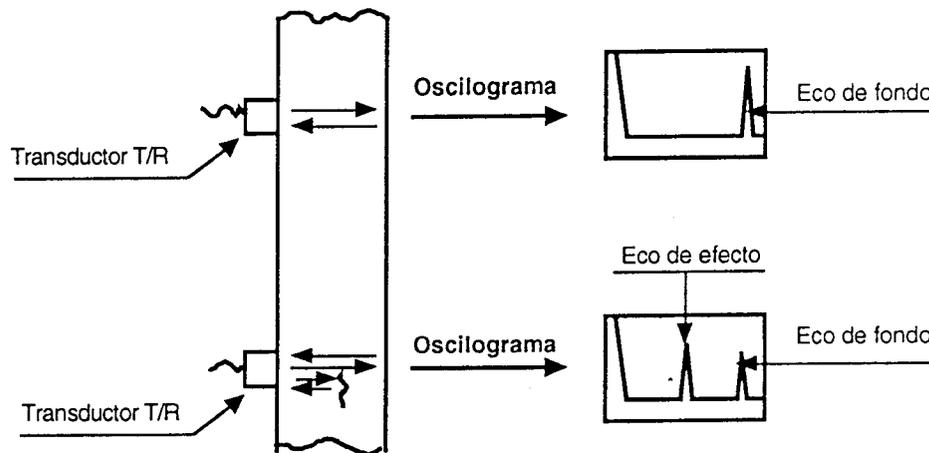


Figura 1. Esquema de un equipo para Ensayos de Ultrasonido.

Una de las representaciones que pueden obtenerse en el display, es la denominada A-scan, en la misma se observa un gráfico del tipo x-y, que en ordenadas muestra la amplitud del eco, y en abscisas tiempos que resultan proporcionales a las distancias recorridas por la onda, que permite localizar la ubicación del reflector. En la figura 1 se muestra un gráfico esquemático del equipo.

El transductor dependen las características de la onda generada, en particular la frecuencia de la señal

queda determina por el espesor del cristal, mientras que la longitud del pulso, es decir el ancho de banda del espectro de frecuencia esta determinada por la amortiguación del cristal. En la figura 2.a se observa la señal de entrada y en la figura 2.b su espectro de frecuencia, para un palpador de 2 Mhz de frecuencia central.

Como se ha mencionado al principio de esta sección esta técnica es de aplicación rutinaria con el fin de realizar tareas de control de calidad y mantenimiento predictivo. Cuando este método se emplea para la evaluación de defectos en el interior de una pieza, el método standard permite determinar la ubicación de tal defecto, y la altura de eco producida por el mismo, se compara con la producida por un defecto patrón ubicado a la misma distancia, de modo que no permite obtener ni el tamaño ni la orientación real de la fisura o defecto.

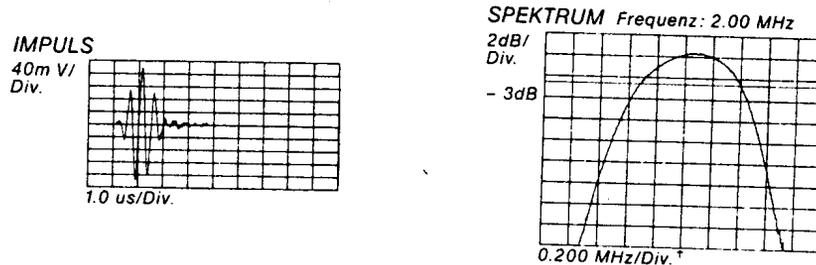


Figura 2. Parámetros de un equipo de Ultrasonido.

En muchas situaciones reales, especialmente en presencia de microfisuras, se produce el fenómeno de difracción de ondas, y resulta confuso el análisis de la señal reflejada por la aparición de ecos espúreos, que dificultan o invalidan el ensayo. Para comprender mejor este problema es que en los últimos años se ha propuesto la simulación del problema mediante métodos computacionales. En particular Ludwig y Lord [1-3] han empleado el Método de Elementos Finitos, y en este trabajo se parte de dichas referencias.

### FORMULACION DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista mecánico el problema a resolver es el de propagación de ondas en medios elásticos, que para el problema continuo viene gobernado por [6]:

$$G \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + 2G) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

donde  $\mathbf{u}$  y  $\ddot{\mathbf{u}}$  son los desplazamientos y aceleraciones del sólido,  $\rho$  es la densidad del mismo, y  $\lambda$  y  $G$  son constantes del material.

El problema definido por la ecuación (1) es un caso particular del problema elastodinámico en dos dimensiones. La discretización espacial de este problema mediante el empleo del Método de Elementos Finitos resulta bien conocida [7-9], y para el caso de amortiguamiento despreciable se expresa mediante:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f}(t) \quad (2)$$

donde  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{K}$  son las matrices de Masa y Rigidez, respectivamente y  $\mathbf{f}(t)$  es la excitación del sistema.

Este problema ha sido analizado ampliamente en la literatura y en este problema las dificultades radican en el tipo de señal a imponer, armónica con una frecuencia del orden de 1 Mhz. La discusión de las condiciones de

contorno adecuadas para modelar el transmisor y el receptor se tratan en el próximo punto, y a continuación se discuten el impacto de las discretizaciones espacial y temporal, así como el esquema numérico empleado para integrar las ecuaciones del movimiento discretizadas definidas por la ecuación (2).

Un tópico frecuentemente discutido en la literatura es la conveniencia de emplear esquemas explícitos o implícitos para resolver el problema definido por las ecuación (2). Numerosos textos discuten el tema [7-10], y Hughes [9] señala que los métodos explícitos son particularmente indicados para el problema de propagación de ondas.

En este problema la señal de entrada es del orden de 1 Mhz, y la malla de elementos finitos que representa al sólido, debe ser capaz de representar dicha frecuencia. En la práctica ello impone mallas bastante densas, si se desea que los autovalores del problema discreto aproximen a los del problema continuo, y por otra parte razones de exactitud imponen limitaciones al incremento de tiempo. Luego en este caso puede resultar desaconsejable utilizar métodos implícitos por las necesidades de almacenamiento y tiempo de computación requerido. Estos aspectos pueden ser aún más remarcables en el caso de PC's, que son los empleados en este trabajo.

Por las razones mencionadas en este trabajo se emplean programas que integran las ecuaciones del movimiento semidiscretizadas mediante el Algoritmo de Diferencias Centrales [7-10], que en la práctica conduce a un programa explícito con la condición de utilizar una matriz de masa diagonal. En este trabajo se emplea el programa unidimensional ONDA1D, basado en el texto de Cook et al. [10], y el hidrocódigo BETA [11] pra tratar el problema bidimensional.

Esta propuesta representa una novedad respecto a los trabajos de Ludwig y Lord [1-3], que han integrado la ecuación (2) mediante un esquema implícito basado en el Método de Newmark.

### MODELADO DEL TRANSDUCTOR Y DEL RECEPTOR

Uno de los aspectos claves en el tratamiento numérico de tipo de problema es la simulación apropiada de la señal de entrada y la representación correcta de la señal recibida. Para ello deben diseñarse condiciones de contorno adecuadas tanto para el transductor como para el receptor, las que se discuten a continuación.

#### TRANSDUCTOR

En el caso del transductor Ludwig y Lord [1-2] han propuesto representar la señal de entrada mediante desplazamientos impuestos, por la mayor facilidad con que puede modelarse una función armónica suficientemente general en comparación con un estado de cargas. Luego, se aplican condiciones de contorno tipo Dirichlet en correspondencia con el transductor, y Von-Neuman o naturales en el resto del dominio que se estudia.

La señal eléctrica que el transductor le aplica al sólido se representa como un desplazamiento impuesto, que se esquematiza en la figura 3, y que responde a la siguiente expresión (Ludwig y Lord [3], y las referencias allí citadas):

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \delta(x) w(y) f(t) \quad (3)$$

donde  $\delta(x)$  es una función que define la

ubicación de la señal de entrada,  $w(y)$  representa la ventana en la que actua el transductor, y que en este caso resulta:

$$w(y) = 1 \quad \frac{a}{2} \leq y \leq -\frac{a}{2} \quad (4)$$

si bien en este caso la función  $w(y)$  es uniforme, podrían utilizarse otras expresiones. La función  $f$  se expresa mediante:

$$f(t) = \begin{cases} (1 - \cos w_o t) \cos 3 w_o t & 0 \leq t \leq t_{max} \\ 0 & t_{max} \leq t \end{cases} \quad (5)$$

donde  $w_o = 2 \pi f_c$ , y  $f_c$  es la frecuencia de la señal de excitación, que como se ha señalado depende del transductor que se emplee.

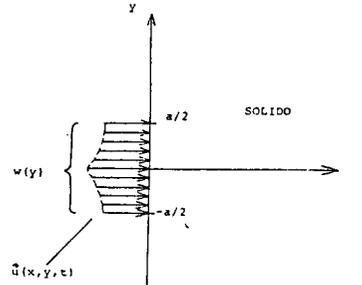


Figura 3. Representación de la señal de entrada

Es importante destacar que en las aplicaciones resueltas con el código BETA, la señal de entrada definida mediante la ecuación (4), se ha modelado mediante velocidades impuestas, para lo cual se ha calculado la derivada de la función  $f$  definida por la ecuación (4). Esta decisión, que también resulta una novedad respecto de los trabajos de Ludwig y Lord [1-3], se adopta ya que en los hidrocódigos, resulta muy sencillo imponer velocidades que luego se integran para obtener los desplazamientos. Si bien esta hipótesis puede inducir errores adicionales en la práctica no se han detectado inconvenientes.

## RECEPTOR

La señal transducida  $S(t)$ , se recupera en este caso a partir de la historia de los desplazamientos para los puntos en los que está aplicado el receptor. Esta señal se modela siguiendo a Ludwig y Lord [3], según la siguiente expresión:

$$S(t) = \frac{1}{2N} \left\{ a_1 \sum_1^N b_i u_{x_i}(t) + a_2 \sum_1^N c_i u_{y_i}(t) \right\} \quad (6)$$

donde  $u_{x_i}$  y  $u_{y_i}(t)$  son los desplazamientos del bloque en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente,  $a_1, a_2, b_i, c_i$  son coeficientes para calibrar la señal obtenida.  $N$  es el número de puntos en los que mide la señal.

## APLICACIONES

### CALIBRACION DE LA SEÑAL PARA UN PROBLEMA 1D

Como se ha discutido, una de las dificultades del problema consiste en el tratamiento adecuado de las señales de alta frecuencia, del orden de 1 a 4 Mhz, y en el impacto que la misma posee en la discretización espacial y temporal del problema. debido a razones de exactitud y estabilidad.

Por este motivo, en este problema, se estudia el transporte de una onda que responde a la ecuación (5) y con

una frecuencia de 1 Mhz, en una barra de 1.5 pulgadas de longitud, 0.4 pulgadas de altura y 0.05 pulgadas de espesor. Las propiedades del material empleadas son:  $E = 10.3^6 \frac{lb}{in^2}$ ,  $\mu = 0.33$ ,  $\rho = 2.54^{-4} \frac{lb \text{ seg}^2}{in^4}$ .

Este problema se ha modelado con los programas ONDA1D y BETA. El primero de ellos resuelve el problema 1D, y modela la señal mediante desplazamientos impuestos. El BETA emplea cuadriláteros lineales, e impone la señal mediante velocidades impuestas.

Se han analizado tres mallas diferentes con 100, 200 y 400 elementos en la dirección longitudinal respectivamente. En el caso del programa bidimensional, en todos los casos se ha dispuesto solo un elemento en la dirección transversal. En todos los casos se ha obtenido muy buen acuerdo entre los dos programas.

En la figura 4 se muestran la forma exacta de la función de entrada, y sus expresiones discretas, evaluadas para cada una de las tres mallas. Puede notarse que para la malla de 100 elementos no se modela adecuadamente la señal que se pretende transportar, de donde surge la inviabilidad de utilizar discretizaciones más bien pobres en presencia de señales de este tipo.

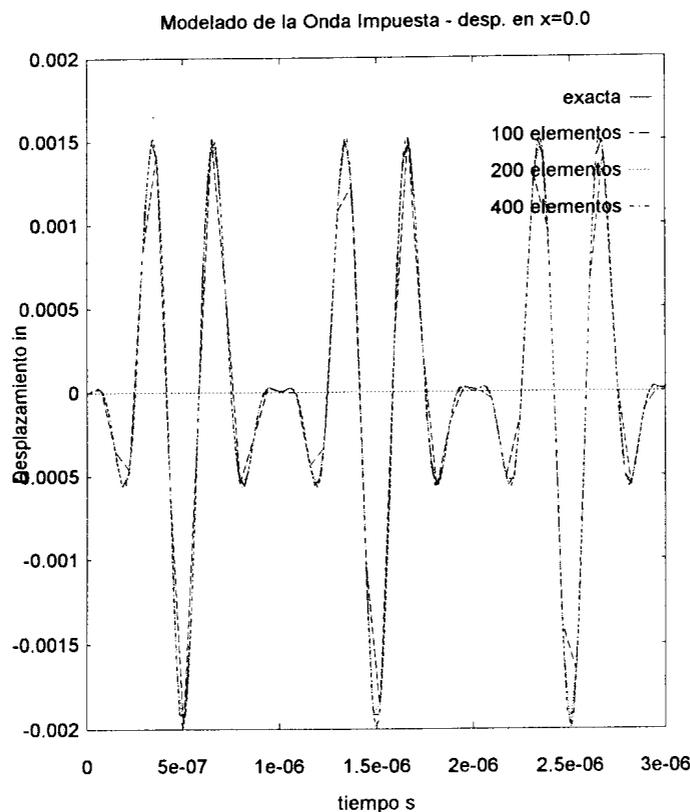


Figura 4. Influencia de la Malla: Señal de entrada

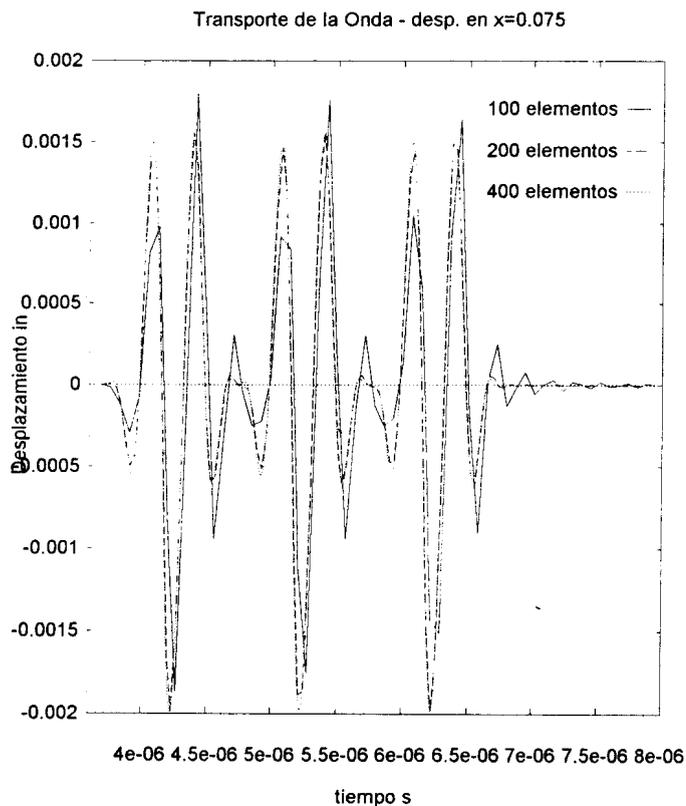


Figura 5. Influencia de la Malla: Señal Transportada

EL problema se revela como mucho más grave cuando se estudia el transporte de la señal que es el propósito de esta aplicación, dado que en este caso la malla de 100 elementos pierde la forma, y disminuye su amplitud. La malla de 200 elementos se comporta mucho mejor, y la malla de 400 elementos arroja excelentes resultados, que son practicamente indistinguibles de la señal de entrada.

Los tiempos de máquina son muy bajos para el programa unidimensional, del orden de 20-40 segundos. En cambio cuando se emplea el código bidimensional de Elementos Finitos, estos tiempos se tornan del orden de 10 minutos, en un 386 DX a 40 Mhz, con coprocesador matemático.

### SIMULACION DE UN ENSAYO DE ULTRASONIDOS

En este caso se estudia un problema propuesto por Ludwig y Lord [3], que consiste en analizar un bloque de aluminio de 1.5 pulgadas de longitud (dirección x), y 2 pulgadas de altura (dirección y), como se muestra en la figura 6. Las propiedades del material empleadas son las siguientes:  $E = 10.3^6 \frac{lb}{in^2}$ ,  $\mu = 0.33$ ,  $\rho = 2.54^{-4} \frac{lb \text{ } s^2}{in^4}$ . El estudio se ha realizado bajo condiciones de deformación plana.

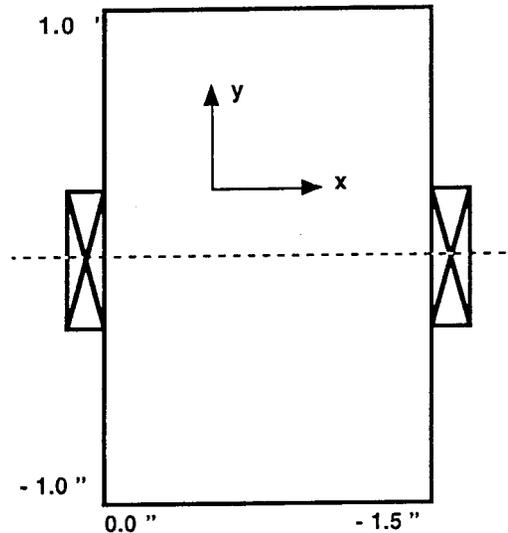


Figura 6. Geometría del Ensayo de Ultrasonido.

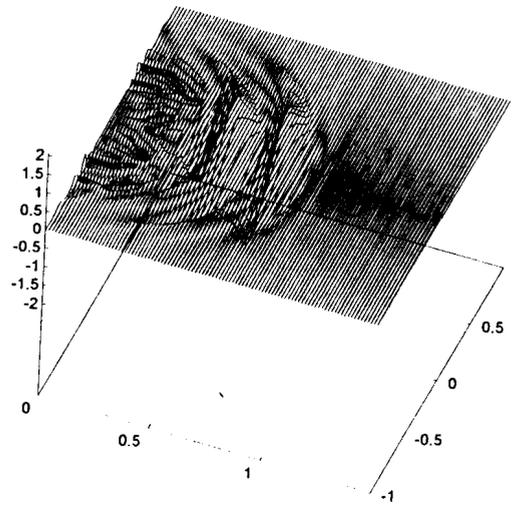
El bloque ha sido discretizado con 5000 elementos cuadriláteros lineales, de los cuales se han dispuesto 100 en la dirección longitudinal y 50 en la dirección transversal. La señal de entrada se representa mediante la ecuación (5), con frecuencia  $f_c = 0.3$  Mhz de frecuencia, el palpador posee 0.5 pulgadas de apertura ( $a = 0.5$  en la ecuación (4)), y está situado en el centro del bloque, como se muestra en la figura 6.

En la figura 7 se ilustra el transitorio mediante un gráfico que muestra el avance de la onda para dos instantes de tiempo diferentes del transitorio, a los 2 y 4  $\mu s$  respectivamente. En dicho gráfico la distribución de los desplazamientos longitudinales  $u_x$  se representan en el eje z, mientras que los ejes x e y representan el sólido.

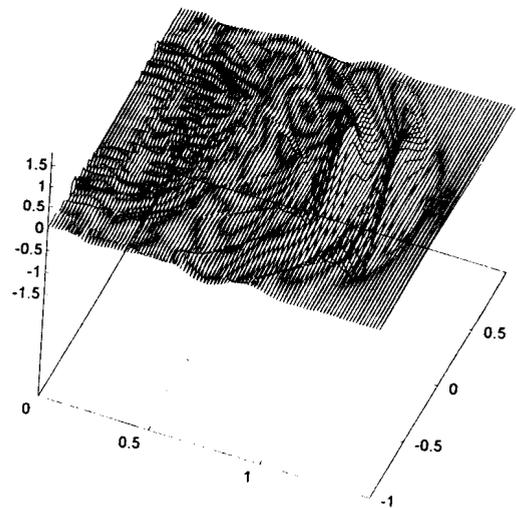
En la figura 8 se muestran la señal de entrada y la señal recibida, modelada según la ecuación (6), así como los resultados numéricos y experimentales debidos a Ludwig y Lord [3], que se representan en la parte inferior derecha de la figura. Puede notarse que la onda de entrada se transporta adecuadamente, y además se observa, desde un punto de vista cualitativo, que se obtiene un buen acuerdo con los resultados disponibles.

Es importante mencionar que la hipótesis simplificativa de deformación plana, limita la validez del estudio al caso cualitativo, ya que el palpador posee dimensiones finitas, y la apertura del haz se manifiesta en el caso real de manera espacial, mientras que la hipótesis de deformación plana impone que el haz sea solamente bidimensional. Luego la única posibilidad de realizar comparaciones cuantitativas se reduce a un análisis en tres dimensiones.

En este caso el proceso requiere alrededor de 5Mb de memoria central, y el cálculo toma 52 minutos en un PC equipado con un procesador DX2 a 66 Mhz, con lo que puede resultar complejo atacar un problema tridimensional con una computadora de este tipo.



**Desplazamiento según X para  $t = 2 \mu\text{s}$**



**Desplazamiento según X para  $t = 4 \mu\text{s}$**

Figura 7 Transporte de la Onda para diferentes instantes del transitorio

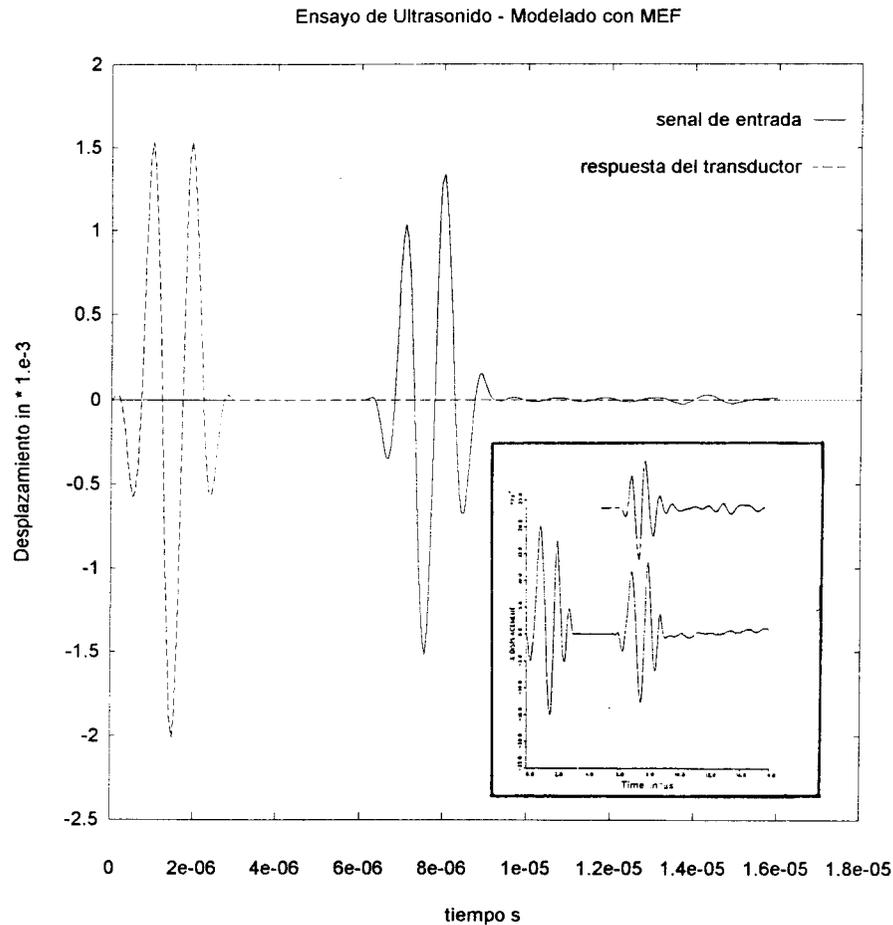


Figura 8 Comparación cualitativa de resultados.

## CONCLUSIONES

En el trabajo se han mostrado los pasos a seguir para simular numéricamente, mediante el Método de Elementos Finitos, un ensayo de Ultrasonidos. Las problemas de aplicación resueltos ilustran la factibilidad de abordar el tema.

Las novedades que presenta este trabajo, respecto de los antecedentes disponibles, consisten en simular el problema mediante el empleo de Códigos explícitos. Además la señal de entrada se ha modelado mediante velocidades impuestas, y se han empleado elementos cuadriláteros lineales.

Las extensiones futuras del trabajo consisten en simular problemas con imperfecciones para estudiar la aparición de ecos espúreos, y la extensión al caso 3D, además de ajustar convenientemente el modelado de

las funciones de entrada y la recepción de las mismas.

En ambos casos las ecuaciones del problema y su discretización son bien conocidas, con lo que las limitaciones y/o dificultades a salvar son de tipo computacional: Requerimientos de almacenamiento en memoria central y velocidad de cálculo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda económica del Laboratorio de Ensayo No Destructivos de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional, que ha financiado este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Ludwig R. y Lord W. *A Finite Element Study of Ultrasonic Wave propagation and Scattering in an Aluminum Block*, Materials Evaluation, 46, pp. 108-113, 1988, American Society for Non-Destructive Testing.
- [2] Ludwig R., Moore D. y Lord W. *Transducer Models for the Finite Element simulation of ultrasonic NDT phenomena*, in Review of Progress in Quantitative NDE, Thompson D.O. and Chimenti C.E. Eds., Vol 6A, pp. 645-655, Plenum Press, New York, 1987.
- [3] Ludwig R. y Lord W. *A Finite Element Formulation for the Study of Ultrasonic NDT system*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 35, 6, pp. 809-820, 1988.
- [4] Harumi K., *Computer Simulation of Ultrasonic in Solids*, Materials Evaluation, 44, pp. 1086-1114, 1986, American Society for Non-Destructive Testing.
- [5] Furukawa T. and Date K., *Simple modeling of Ultrasonic Testing*, Materials Evaluation, September 1994, pp. 1108-1111 1994, American Society for Non-Destructive Testing.
- [6] Achenbach J., *Wave propagation in Elastic Solids*, North-Holland, 1973, New York.
- [7] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L., *The Finite Element Method*, Fourth Edition, Volume 2, McGraw-Hill, 1991.
- [8] Bathe, K.J., *Finite Element procedures in engineering analysis*, Prentice Hall, 1983.
- [9] Hughes T.J.R., *The Finite Element Method*, Prentice Hall, 1987.
- [10] Cook R.D., Malkus D.S and Plesha M.E., *Concept and Applications of Finite Elements Analysis*, Third Edition, John Willey, 1989.

