

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PASO DE UNA ONDA ULTRASÓNICA EN LOS HORMIGONES ELABORADOS MAS USUALES EN EL MEDIO

Edgardo Urtubey^a, Ricardo Schiava^a, Miguel Cárdenas^a

^a *Grupo de Mecánica Computacional, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Avda. Belgrano
(S)1912, 4200 Santiago del Estero, Argentina, eurtubey@unse.edu.ar, www.unse.edu.ar*

Palabras claves: ensayos experimentales, curvas de correlación, simulación numérica.

Resumen. En este trabajo se presenta un estudio experimental y numérico de la resistencia a compresión de los hormigones elaborados mas usados en el medio correlacionado con la velocidad ultrasónica. Se encuestaron empresas locales a fin de determinar cuales son los hormigones mas vendidos y sobre ellos se realizaron ensayos de compresión y de ultrasonido para construir curvas de correlación Resistencia a compresión – Velocidad de la Onda Ultrasónica que permitan usar este Ensayo no Destructivo reglamentado en el CIRSOC 201 vigente para investigar estructuras existentes sobre las que no se tienen datos fehacientes. Determinadas experimentalmente las características de estos hormigones, en un modelo de elementos finitos se simuló numéricamente el paso de la onda ultrasónica a fin de comparar los valores de dichas velocidades obtenidas por este medio con los resultados experimentales.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se llevó a cabo una investigación experimental para evaluar la capacidad de predicción del ensayo de ultrasonido referida a rigidez y resistencia de los tipos hormigones usualmente empleados en el medio. Empleando el método de elementos finitos se simuló numéricamente el paso de la onda ultrasónica con el fin de estudiar la capacidad predictiva de la velocidad de onda del modelo adoptado. El ensayo de ultrasonido permite evaluar la resistencia de un hormigón con un 20% de error cuando se cuenta con curvas de calibración (Popovics et al.1990), y para disminuir este error se debe correlacionar los resultados con otros ensayos como ser esclerometría y CAPO test, lo que implica disponer de un importante equipamiento y el consumo de una alta carga de labor. Estos inconvenientes resaltan la importancia de la simulación computacional siendo necesario realizar experimentaciones para calibrar un paquete de software de elementos finitos apto para estos fines.

2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos se ejecutaron con un marco de carga de accionamiento manual con aro dinamométrico de 5.000 kg y constante $k= 14,02$. Se usó un compresómetro simple, apto para medir deformaciones longitudinales con flexímetro en probetas de hasta 5,00 cm de diámetro. Todas las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y permanecieron sumergidas en agua hasta la edad de ensayo. El equipo para mediciones ultrasónicas usado fue un Controls E46, con un par de transductores de 54 kHz.

2.1 Materiales constituyentes

Las probetas ensayadas fueron de 4,50 cm de diámetro por 9,00 cm de alto, manteniendo la esbeltez de 2. Estas dimensiones reducidas surgen de las limitaciones de equipamiento, fundamentalmente del marco de carga disponible en capacidad de rotura. En total se fabricaron 18 probetas (tres series de 6 probetas cada una). En el laboratorio se determinaron las siguientes características para los materiales usados:

Agregado grueso: TMAG = 12,70 mm; PE AG: 2,69; PU AG: 1,50

Agregado fino: arena de cantera, PE = 2,63; mf = 2,60

Cemento: normal (IRAM 50.000), PE adoptado = 3,15

2.2 Dosificaciones

La dosificación de los hormigones empleados se indica en Tabla 1.

Proporción (kg/m ³)	Serie DPS	Serie DPS_1	Serie DPS_2
Agregado grueso	834	834	834
Agregado Fino	936	832	728
Cemento	400	400	400
Agua	200	240	280

Tabla 1. Dosificaciones de los hormigones ensayados

2.3 Ensayos

Las probetas se ensayaron descargadas con el aparato de ultrasonido, midiendo tiempos de tránsito a fin de calcular velocidades; tres probetas de cada serie fueron sometidas luego a carga axial de compresión monotónica hasta rotura para trazar la curva $\sigma - \varepsilon$, ver Figura 1,

con el objeto de determinar E (módulo de elasticidad longitudinal). Con los datos obtenidos se trazaron curvas de correlación Velocidad Ultrasónica - Resistencia a compresión, **Figura 2** (Urtubey et al. 2003).

3 RESULTADOS Y CORRELACIONES EXPERIMENTALES

El módulo E se determina por la pendiente de la curva $\sigma - \varepsilon$ en el rango lineal. Una revisión reglamentaria sobre la determinación de E en función de la resistencia a compresión arroja el siguiente resultado:

CIRSOC 201 – 1982, en MPa

$$E_b = 7502 f_{ck}'^{0.4414} \quad (1)$$

Norma Brasileña, NBR 6118 – 2002, en MPa

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}'^{0.5} \quad \text{con} \quad E_c = 0.85 E_{ci} \quad (2)$$

CEB/FIP Model Code - 1991, en MPa

$$E_{ci} = \alpha_E 21500 \left[\frac{f_{ck}' + 8}{10} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$\alpha_E = 1,20$ para basalto; $1,00$ para granito; $0,90$ para materiales calcáreos; $0,70$ para areniscas

ACI 318M – 2002, en MPa

$$E_c = 4700 f_c'^{0.5} \quad (4)$$

En todas estas propuestas E_{ci} es el módulo de elasticidad al origen o inicial, según la notación de CEB/FIP Model Code 91, E_c es el módulo secante, aceptándose que $E_c = 0,85$ a $0,90$ de E_{ci} valores todos considerados a la edad de 28 días (Maldonado et al. 2002). Los valores obtenidos en los ensayos experimentales se indican en Tabla 2.

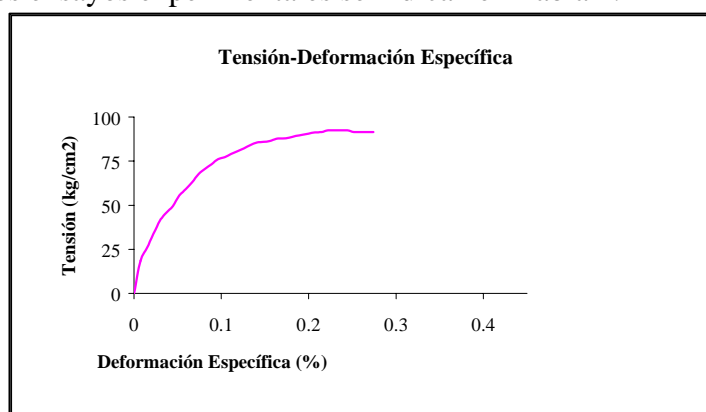


Figura 1: Curva $\sigma - \varepsilon$ con carga monotónica.

Los módulos E_{ci} obtenidos experimentalmente y que fueron utilizados en la simulación numérica son: para el tipo DPS: $E_{ci} = 200.000$ MPa; tipo DPS_1: $E_{ci} = 150.000$ MPa y para tipo DPS_2: $E_{ci} = 110.000$ MPa.

Serie	Diámetro	Altura	Volumen	Peso	Densidad	Densidad	Tensión Rotura	Tiempo	Velocidad
DPS	cm	cm	cm ³	g	g/cm ³	promedio	kg/cm ²	µseg	m/seg
1	4,43	9,05	139,491238	337,1	2,41663925		260	23,9	3787
2	4,44	9,06	140,276537	332,1	2,36746649		189	24,8	3653
3	4,46	9,06	141,543136	341,4	2,41198557	2,39255813	244	22,5	4026
4	4,48	9,11	143,603592	341,8	2,38016331		249	23,3	3910
5	4,47	9,07	142,3355	337,7	2,37256342	2,39	244	27,2	3334
6	4,46	9,03	141,07445	339,5	2,40653074		235	23,6	3826
Total					14,3553488				22536
promedio									3756
DPS_1									
I	4,53	9	145,054034	353,2	2,43495469		226	24,1	3734
II	4,53	9	145,054034	347,8	2,39772719		172	22,9	3930
III	4,54	9,06	146,666457	352,9	2,40613981		166	23,1	3922
IV	4,54	9,07	146,82834	350,1	2,38441706	2,40826445	221	23,3	3893
V	4,53	9,03	145,537547	352,2	2,41999406		157	23,2	3892
VI	4,53	8,96	144,409349	347,5	2,4063539	2,41	230	23,2	3862
Total					14,4495867				23233
promedio									3872
DPS_2									
A	4,47	9,06	142,17857	338,7	2,38221555		159	22,4	4044
B	4,54	9,07	146,82834	356,6	2,42868645		150	22,5	4031
C	4,54	8,8	142,457486	326,5	2,29191185	2,37696698	falla	23,6	3729
D	4,54	8,98	145,371389	348,4	2,39662015		falla	23,6	3805
E	4,53	8,95	144,248178	341,8	2,36952733	2,38	217	23,2	3858
F	4,54	9,02	146,018923	349,4	2,39284055		130	23,1	3905
Total					14,2618019				23372
promedio									3895

Tabla 2: Resultados experimentales.

Respecto a la correlación Resistencia-Velocidad, para los hormigones elaborados, en este trabajo se ha llegado a la expresión:

$$R = 0,1643 V_{us} - 440,82 \quad (5)$$

Donde V_{us} es la velocidad ultrasónica.

4 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER

En la simulación numérica se utilizó el modelo lineal de Drucker Prager, representado en la **Figura 3**, el cual presenta una superficie de fluencia circular en el plano deviatorico (plano π), flujo inelástico asociado en el plano deviatorico y ángulos de dilatación y de fricción separados. El criterio de fluencia para el modelo lineal se formula en función de tres invariantes.

$$F = t - p \operatorname{tg} \beta - d = 0 \quad (6)$$

con

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K}\right) \left(\frac{\tau}{q}\right)^3 \right] \quad (7)$$

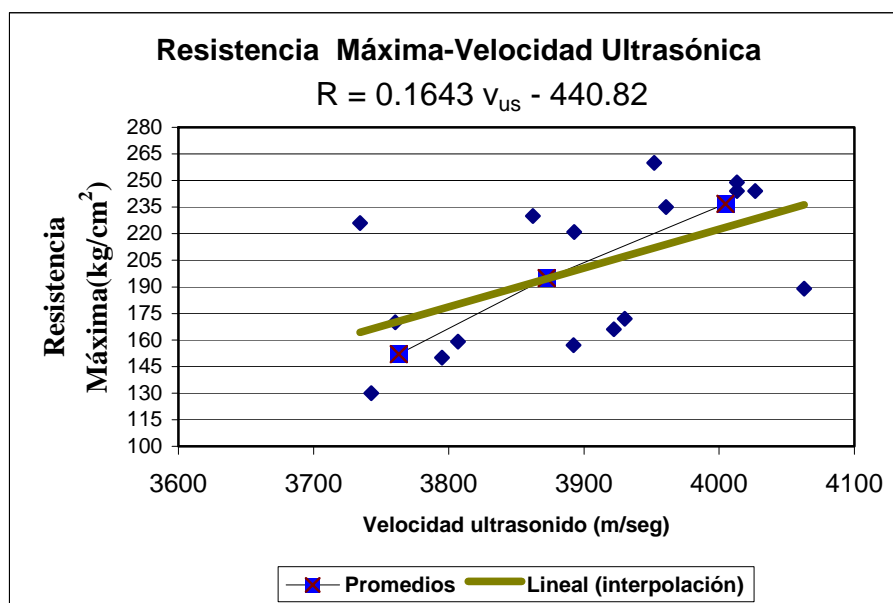


Figura 2: Correlación Resistencia Máxima – Velocidad Ultrasónica.

Donde: $\beta(\theta, f_i)$ es la inclinación de la superficie lineal de fluencia en el plano $p-t$, ángulo de fricción del material, d es la cohesión del material y $K(\theta, f_i)$ es la relación entre la tensión de fluencia en tracción triaxial y la tensión de fluencia en compresión triaxial que controla la dependencia de la superficie de fluencia de los valores de la tensión principal intermedia.

Los parámetros en los datos de ingreso definen las formas de las superficies de fluencia y de flujo en los planos meridional y desviatorio así como otras características del comportamiento inelástico.

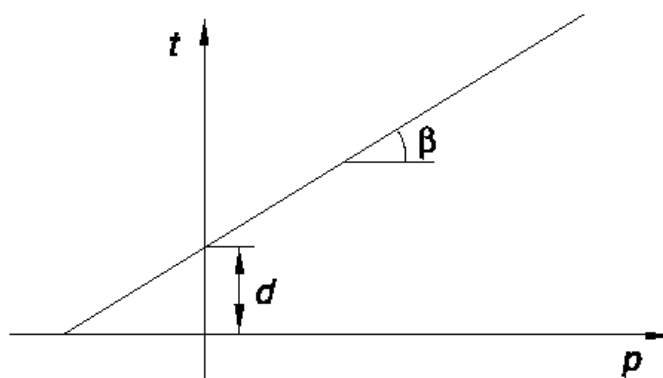


Figura 3: Superficie de fluencia en plano meridional, Drucker Prager lineal

5 CORRELACIONES ENTRE ENSAYOS EXPERIMENTALES Y SIMULACIONES NUMÉRICAS

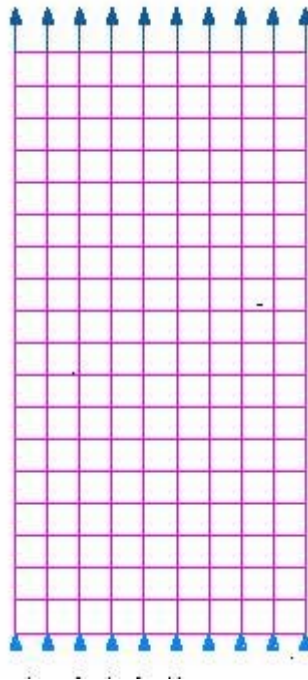
Las probetas se ensayaron con ultrasonido y en base a la medición de los tiempos de tránsito ultrasónicos se calcularon velocidades. (Urtubey et al. 2003).

Posteriormente se ensayaron a compresión axial monotónica hasta la rotura y a partir de las curvas σ - ε resultantes se determinaron módulos de Young mecánicos con el fin de ser

utilizados en la simulación numérica.

La propagación de la onda ultrasónica se simuló con la ayuda de un programa de elementos finitos empleando el modelo constitutivo material elastoplástico de Drucker-Prager, asumiendo condiciones de tensión plana para reducir el problema de la propagación de ondas a dos dimensiones. Se discretizó la probeta ensayada mediante una malla de elementos finitos cuadriláteros de cuatro nodos. La geometría del espécimen se ha representado por 162 elementos y 160 nodos con 380 grados de libertad. La malla estructurada resultó compuesta por 9 elementos en el ancho (eje 1) y 18 elementos en su altura (eje 2). La entrada del transductor ultrasónico se representa prescribiendo una historia de desplazamientos aplicada a los diez nodos de la parte superior (TOPLINE) de la malla (nodos 38, 57, 76, 95, 114, 133, 152, 171 y 190). Los nodos de la cabeza inferior (nodos 1, 20, 39, 58, 77, 96, 134, 153, 172 que constituyen el grupo BASELINE) tienen restricción en la dirección vertical. Se identifica una faja central, ULTRA, constituida por los elementos 73 al 90, cuyos nodos, borde izquierdo, son del 77 al 95, sobre los cuales se estudian los valores de los desplazamientos U_1, U_2 y de las velocidades V_1, V_2 obtenidos en la simulación. Las condiciones de borde impuestas en el modelo intentan representar lo más fielmente posible la realidad de los ensayos experimentales. En **Figura 4** se muestra la malla, las condiciones de borde impuestas y la aplicación de la onda ultrasónica en el borde superior de la malla.

TOPLINE



BASELINE

Figura 4: Malla, condiciones de borde y aplicación de la onda ultrasónica

La gráfica de amplitud de onda, que ilustra la forma de propagación del frente de onda a través de la probeta se presentan en **Figura 5** (E. Urtubey, 2004).

Analizando los datos registrados en el archivo de salida se puede determinar el tiempo de tránsito, es decir lo que demora la onda en atravesar la probeta y llegar al nodo 77. Los datos de ese análisis se vuelcan en el siguiente gráfico de la **Figura 6**. Las curvas DPS, DPS_1 y DPS_2 corresponden a la simulación de paso de la onda por los tres diferentes tipos de

hormigones ensayados experimentalmente considerando material homogéneo y elastoplástico (Drucker-Prager) y estado plano de tensiones.

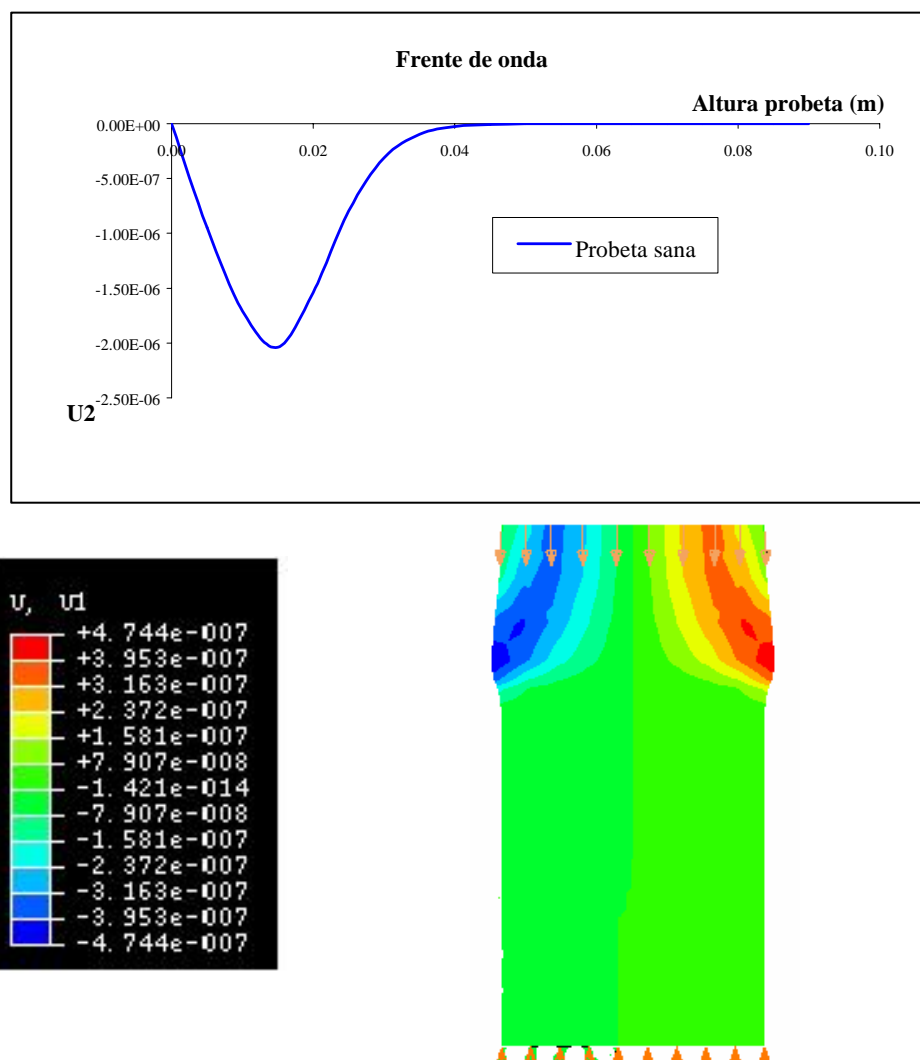


Figura 5: Arriba, frente de la onda ultrasónica para el tiempo $t = 1,0 \times 10^{-5}$, elasticidad isótropa. Abajo, contorno de desplazamientos para el tiempo $t = 1,0 \times 10^{-5}$.

6 CONCLUSIONES

Del estudio realizado surge que mediante la simulación numérica del paso de la onda ultrasónica a través del método de elementos finitos es posible predecir razonablemente las velocidades de onda para hormigones de distintas características mecánicas.

Se observa que en la simulación la onda ultrasónica presenta un ligero retraso en concordancia con los valores decrecientes de módulos de elasticidad inicial y la menor resistencia de los hormigones, lo que es concordante con las observaciones experimentales.

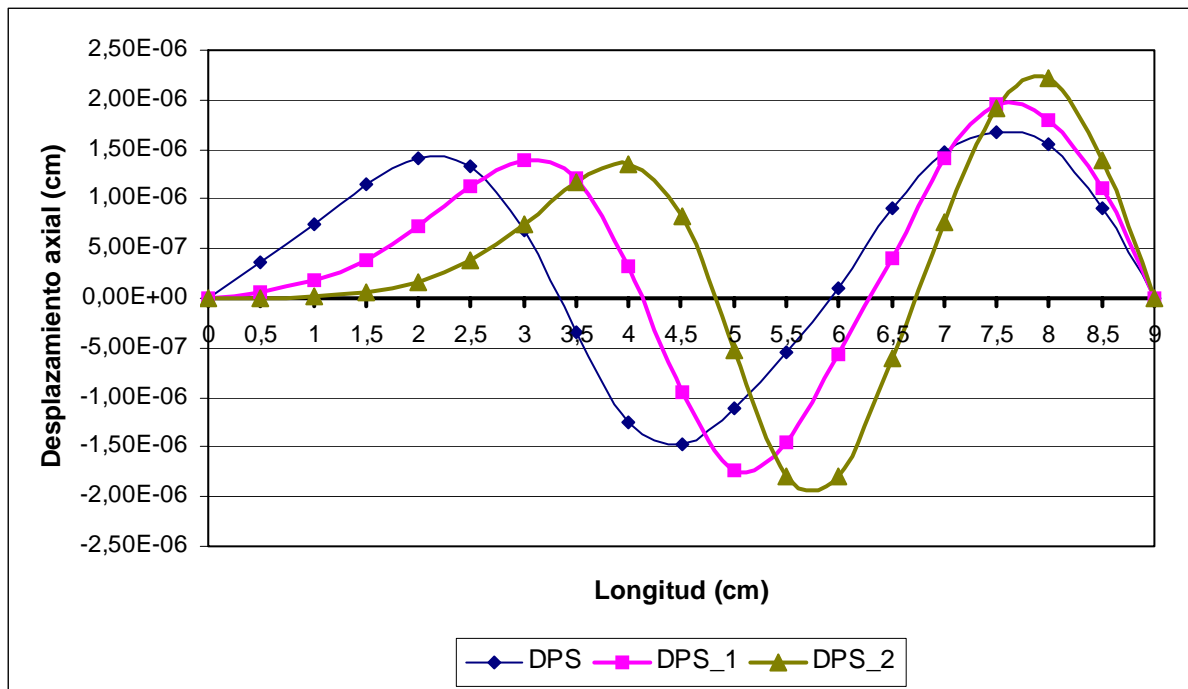


Figura 6: Tránsito de la onda ultrasónica en los distintos hormigones.

Los tiempos de tránsito en la simulación, en microsegundos son: 19,67; 20,8 y 22,3 para los hormigones DPS, DPS_1 y DPS_2 respectivamente, que se corresponden con las velocidades en m/seg: 4575; 4327 y 3913.

Los valores de velocidades obtenidos mediante la simulación son superiores a los experimentales. Una de las razones de esta discrepancia se puede adjudicar a los valores de los parámetros del modelo material utilizado. Además, se debe señalar que las mediciones experimentales de los tiempos de paso ultrasónico se ven afectadas por muchas variables como el contenido de humedad de las probetas, el TMAG, el tipo de gel de contacto usado, etc. Eso justifica las diferencias con los resultados que se obtienen de la simulación numérica pero no invalida el uso de esta metodología.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Maldonado, N., Tornello, M., Módulo de elasticidad en el Proyecto CIRSOC 201-02 y su importancia en las estructuras de hormigón armado, *CeReDeTec, UNT, Facultad Regional Mendoza*, 2002.
- Popovics S., Rose J.L., Popovics J.S. The behaviour of Ultrasonic Pulses in Concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol 20, pp 259-270, 1990.
- Urtubey, E., Schiava, R., Etse, G., Simulación numérica de la propagación de una onda ultrasónica a través de un sólido elastoplástico – Evaluación de daño, *Mecánica Computacional Volumen XXIII.*, 2003.
- Urtubey, E., *Estudio de la propagación de una onda ultrasónica a través de un sólido elastoplástico*, Tesis de Magíster en Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería, UNSE, 2004.