

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE UNA ONDA ULTRASÓNICA A TRAVÉS DE UN SÓLIDO ELASTOPLÁSTICO – EVALUACIÓN DE DAÑO

Edgardo Urtubey^{*}, Ricardo Schiava^{*} y Guillermo Etse[†]

^{*} Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Santiago del Estero
Avda. Belgrano (S) 1912, 4200 Santiago del Estero, Argentina. TE: 54-0385-4372354 – Interno 1904
e-mail: urtubey@unse.edu.ar, schiava@unse.edu.ar

[†] CEMNCI, Universidad Nacional de Tucumán
e-mail: getse@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: ondas ultrasónicas, propiedades elásticas, daño

Resumen. *En trabajos anteriores (ENIEF 2001 y ENIEF 2002) se han presentado simulaciones numéricas de la propagación de ondas ultrasónicas a través del hormigón utilizando descripciones materiales elásticas y elastoplásticas y analizando situaciones previas y posteriores a la carga máxima. En este trabajo se comparan valuaciones ultrasónicas y mecánicas del daño producido en probetas de hormigón sometidas a cargas axiales de compresión cíclicas y monotónicas. El daño es evaluado mecánicamente relacionando valores del módulo de Young en la condición elástica inicial y después de producirse la fisuración. Esta misma evaluación se realiza ultrasónicamente confrontando las velocidades de onda en las probetas antes de la carga y después de la fisuración. También se presenta una correlación entre las velocidades de onda y las resistencias registradas.*

1 INTRODUCCIÓN

El uso de Métodos No Destructivos para evaluar resistencias y niveles de daño en estructuras existentes, es de suma importancia. Una de las técnicas más difundidas se basa en el ultrasonido. En este trabajo se realizan mediciones ultrasónicas sobre probetas de hormigón sometidas a cargas axiales de compresión tanto monotónicas como cíclicas con el argumento de que la velocidad de la onda es proporcional a las propiedades elásticas del material. Los resultados se correlacionan con mediciones mecánicas del módulo de Young y por ambos caminos se hace una evaluación de la progresión del daño. En etapas posteriores se presentará la simulación numérica de este fenómeno.

2 ULTRASONIDO

2.1 Oscilaciones

Un movimiento cualquiera que se repite a intervalos iguales de tiempo se llama *movimiento periódico*. El desplazamiento de una partícula en un movimiento periódico se puede expresar siempre mediante senos y cosenos por eso se llama también *movimiento armónico*. Si una partícula animada de movimiento periódico se mueve alternativamente en un sentido y en otro siguiendo la misma trayectoria, su movimiento se denomina *oscilatorio o vibratorio*. Las vibraciones cesan debido a que las fuerzas de rozamiento disipan la energía del movimiento. Estos movimientos se llaman *armónicos amortiguados*. Es posible contrarrestar el amortiguamiento entregando energía al sistema. No solamente oscilan los sistemas mecánicos, las ondas de radio, las microondas y la luz visible son campos vectoriales magnéticos y eléctricos oscilantes. La analogía es completa: *las oscilaciones mecánicas y electromagnéticas se representan mediante las mismas ecuaciones matemáticas fundamentales*. El período T de un movimiento armónico es el tiempo necesario para completar un ciclo. La *frecuencia* del movimiento ν es el número de ciclos por unidad de tiempo. Es decir:

$$\nu = 1 / T \quad (1)$$

La unidad de frecuencia es ciclos / segundo o *hertz*, en honor a Heinrich Hertz. La posición para la cual no obra ninguna fuerza neta sobre la partícula oscilante se llama posición de equilibrio. *Elongación* lineal o angular es la distancia lineal o angular de la partícula oscilante a su posición de equilibrio en un instante cualquiera. Para una partícula que oscila sobre una línea recta entre límites fijos, su elongación cambia periódicamente en magnitud y sentido. Su velocidad y su aceleración también varían periódicamente y como

$$F = m \cdot a \quad (2)$$

se deduce que la fuerza F cambia del mismo modo. En términos de energía se puede decir que

una partícula que tiene un movimiento armónico experimenta un vaivén respecto a su posición de equilibrio en la cual su energía potencial es mínima. La fuerza que actúa sobre la partícula se puede obtener a partir de la función de energía potencial:

$$F = - dU / dx \quad (3)$$

La fuerza es *restauradora* porque siempre obra acelerando a la partícula hacia su posición de equilibrio. La energía mecánica total E es la suma de la energía cinética mas la potencial:

$$E = K + U \quad (4)$$

E es constante si no actúan fuerzas no conservativas, como la fuerza de rozamiento.¹

2.2 Ondas en medios elásticos - Ondas mecánicas

El movimiento ondulatorio aparece en casi todos los campos de la física, ondas formadas en el agua, ondas luminosas, ondas de radios, ondas electromagnéticas. Incluso un modelo atómico responde a la mecánica ondulatoria.

Las ondas en medios deformables o medios elásticos, ondas mecánicas, por ejemplo, las sonoras, se originan al desplazarse una porción de un medio elástico de su posición normal, oscilando con respecto a una posición de equilibrio. Esta perturbación u onda avanza a través del medio, se transmite de una capa a la siguiente. El medio no se mueve, las diversas partes del medio oscilan en trayectorias limitadas, por ejemplo, los objetos flotantes se mueven arriba, abajo, adelante, atrás pero las ondas son las que avanzan. El movimiento ondulatorio puede transmitir energía a distancias considerables. La energía es la cinética y la potencial de la materia; la transmisión se efectúa pasando de una parte de la materia a otra, no mediante movimientos a gran distancia de la materia misma. Las ondas mecánicas se caracterizan por el transporte de energía a través de la materia mediante el movimiento de una perturbación en esa materia sin que haya un movimiento de conjunto correspondiente de la materia misma.

Para la transmisión de las ondas mecánicas es necesario un medio material; en cambio, las ondas electromagnéticas, la luz, no necesitan medio material. La inercia y la elasticidad del medio determinan la velocidad de la onda. La elasticidad da lugar a las fuerzas restauradoras; la inercia dice cómo responderá la porción desplazada a esas fuerzas restauradoras.¹

2.3 Ondas sonoras - Ondas audibles, ultrasónicas e infrasonicas

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales. Se pueden propagar en sólidos,

líquidos y gases. Las partículas materiales que transmiten tales ondas oscilan en la dirección de propagación. Las ondas sonoras, que pueden estimular el oído, varían de 20 y 20.000 ciclos/seg (20 Hz a 20 kHz). Frecuencia menores se dicen *infrasónicas* y son generadas por grandes fuentes emisoras como los terremotos. Las frecuencia mayores o *ultrasónicas* se pueden producir mediante vibraciones elásticas de un cristal de cuarzo inducidas por resonancia con un campo eléctrico alterno que se aplique (efecto piezoeléctrico). Es posible producir frecuencias ultrasónicas hasta de 6×10^8 Hz por este procedimiento.¹

2.4 El fenómeno piezoeléctrico

Cuando se impone un cambio dimensional a un material dieléctrico, ocurre una polarización y se genera un voltaje o un campo eléctrico. Los materiales dieléctricos que muestran este comportamiento reversible se dicen *piezoeléctricos*. Los materiales que están polarizados permanentemente como el bario, el titanio y el cuarzo, muestran este efecto.²

Con materiales ferroeléctricos se pueden obtener efectos semejantes pero mas intensos. Hay diferencias entre estos fenómenos, en la piezoelectricidad, caso del cuarzo, se requiere un cristal sencillo. Los materiales ferroeléctricos contienen dominios que crecen en respuesta al campo aplicado y esto tiene dos consecuencias importantes, la primera, el almacenamiento de carga es mayor, la segunda, no se requiere un cristal sencillo. La posibilidad de usar un material policristalino en vez de un solo cristal tiene grandes ventajas comerciales.³

2.5 El aparato de ultrasonido y sus aplicaciones

El aparato ultrasónico ha sido diseñado para medir tiempos de propagación de vibraciones ultrasónicas a través del hormigón o de otro material. Estas mediciones permiten obtener información sobre las condiciones mecánicas y físicas de una estructura, por ejemplo, se pueden detectar microfisuras, nidos de abejas, inclusiones involuntarias de materiales extraños, tales como fragmentos de madera, poliestireno o papel, daños generados por heladas o por fuego, se puede evaluar resistencia a compresión, tiempos de desencofrado y de pretensado, módulo de elasticidad, homogeneidad del hormigón proyectado.⁴

2.5.1 Velocidad

La velocidad de la onda ultrasónica a través del hormigón puede obtenerse como sigue:

$$V = \frac{S}{T} \cdot 10^6 \quad (5)$$

donde:

V = Velocidad de la onda ultrasónica en m/seg

S = Distancia entre las cabezas en metros

T = Tiempo registrado por la unidad ultrasónica en μ seg

La distancia entre las cabezas debe evaluarse con una aproximación de $\pm 1\%$. Usualmente la velocidad ultrasónica para hormigón varía entre 4.000 y 4.800 m/seg. Puesto que la velocidad de la onda ultrasónica depende de la densidad del medio, sería deseable conocer el tipo de cemento, la relación agua-cemento, el contenido de humedad, las condiciones de maduración.⁴

2.5.2 Estimación del módulo elástico dinámico

A partir de las velocidades de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico como sigue⁴:

$$E_D = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (6)$$

donde:

V = Velocidad en km/seg

ρ = Densidad del hormigón en kg/m³

ν = Relación de Poisson (para hormigón de alta resistencia $\nu = 0,15$; para hormigón de baja resistencia $\nu = 0,30$)

E_D = Módulo elástico dinámico en MN/m²

2.5.3 Estimación de la resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón puede determinarse usando la velocidad de pulso mediante:

- a) Correlaciones gráficas entre V y R obtenidas ensayando probetas.

Se requiere un mínimo de 30 probetas ensayadas. El valor promedio de la velocidad de pulso se obtiene a partir de tres probetas sometidas a idénticas condiciones de ensayo. Las variaciones de resistencia y velocidad de pulso requeridas para la correlación se logran modificando la relación agua-cemento, el grado de compactación, etc. Con los resultados se construye la curva de correlación gráfica entre V y R, usando cualquier procedimiento de ajuste de curva a una nube de puntos.

- b) Correlaciones analíticas conocidas entre V y R

Se han empleado las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} R &= a V^b \\ R &= a e^{bV} \\ R &= a V + b V + c \end{aligned} \quad (7)$$

En las cuales V = es la velocidad de propagación de onda medida
 a , b , y c son constantes que se determinan mediante ensayos

La precisión de la estimación varía según los datos que se dispongan (composición del hormigón y resultados de las probetas ensayadas).⁵

2.5.4 Inconvenientes del método

a) *Precisión en las mediciones*: Dado que la velocidad de propagación de la onda se obtiene como $V = S / T$, midiendo la longitud de camino (S) con una precisión de $\pm 1,0 \%$ y el tiempo (T) de tránsito con una precisión del $\pm 2,0 \%$ resultará que la velocidad de pulso (V) se puede obtener con una precisión del $\pm 3,0 \%$. Dado que el módulo elástico E varía con al cuadrado de la velocidad de pulso, la precisión en su medición será alrededor de $\pm 6,0 \%$. Aunque no está claro que la velocidad de pulso resulte influida por la longitud del camino recorrido, se sugieren los siguientes valores mínimos en función del tamaño máximo del agregado grueso (TMAG)

100 mm para hormigones con TMAG < 30 mm

150 mm para hormigones con TMAG < 45 mm

b) *Influencia de las condiciones de ensayo*: Debe establecerse un adecuado contacto entre la superficie del concreto y el transductor, usando si es necesario, una sustancia para mejorar el acoplamiento. Variaciones de la temperatura ambiente de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ no ocasionan cambios significativos en la velocidad de pulso en el hormigón. Para temperaturas mayores y menores se han observado cambios en la velocidad de pulso en concretos secos y saturados por lo cual las mediciones efectuadas deberán corregirse.

Efectos varios: la velocidad del pulso es afectada por la composición del hormigón, la frecuencia de la emisión ultrasónica (los pulsos de alta frecuencia atenuan más), la edad y la heterogeneidad del hormigón, la cantidad y disposición de la armadura.⁶

3 FASE EXPERIMENTAL

3.1 Equipamiento

Se usó un marco de carga manual con aro dinamométrico de 5.000 kg, $cte = 14,705$. Esto limita las dimensiones de las probetas. Se fabricó un compresómetro simple para medir las deformaciones longitudinales con flexímetro. Se adecuó un extractor existente para el desmoldado de las probetas 24 horas después de coladas. Se contó con un encabezador de tamaño adecuado, se usó azufre solamente. En algunos casos se pulió y engrasó la cabeza de

la probeta para reducir la fricción. Todas las probetas permanecieron sumergidas en agua hasta la edad de ensayo.

El aparato para mediciones ultrasónicas usado es un Controls E46, con un par de transductores de 54 kHz.

3.2 Moldes

A partir de un tubo de PVC se fabricaron 10 moldes cilíndricos de aproximadamente 4,5 cm de diámetro por 9,0 cm de altura a fin de mantener una esbeltez igual a 2. Estas dimensiones surgen de las limitaciones de equipamiento, fundamentalmente, del marco de carga disponible.

3.3 Materiales

En laboratorio se determinaron las características de los materiales a usar, a saber:

Agregado grueso

- canto rodado, extraído del río Dulce, peso específico PE = 2,66; peso unitario PU = 1.645 kg/m³, absorción = 0,8 %; el TMAG es 3/8" (9,52 mm), la serie granulométrica se cortó en el Tamiz N° 4 (4,8 mm).

- piedra partida, (esquisto cuarzoso micáceo, cantera San Juan, Los Cerrillos) PE = 2,61; PU = 1.645; desgaste Los Ángeles, 24 %; polvo adherido, 3 ml %.

Agregado fino: arena de cantera, PE = 2,63; mf = 2,59; absorción = 0,4 %

cemento: común (IRAM 1503), se adopta PE = 3,15

3.4 Dosificaciones

Se han elaborado las siguientes dosificaciones:

Agregado grueso: canto rodado

1) Serie 1 (verde, números arábigos), relación a/c = 0,6

Cemento.....0,686 kg

Agua.....0,412 “

Arena.....2,078 “

Canto rodado...1,542 “

2) Serie 2 (roja, números arábigos), relación a/c = 0,7

Cemento.....0,588 kg

Agua.....0,412 “

Arena.....2,162 “

Canto rodado...1,542 “

Agregado grueso: piedra partida

3) Serie 3 (verde, números romanos), relación a/c = 0,6

Cemento.....0,686 kg

Agua.....0,412 “

Arena.....2,000 “

- Piedra partida...1,600 “
- 4) Serie 4 (roja, números romanos), relación a/c = 0,7
- Cemento.....0,686 kg
- Agua.....0,480 “
- Arena.....2,000 “
- Piedra partida...1,600 “

3.5 Ensayos

Todas las probetas se ensayaron previamente con el aparato de ultrasonido, midiendo tiempos de tránsito a fin de calcular velocidades y el módulo Edo (ultrasónico no fisurado); algunas probetas de cada serie fueron sometidas luego a carga axial de compresión monotónica, hasta rotura, para trazar la curva $\sigma - \varepsilon$ con el objeto de establecer los rangos mas adecuados de la carga cíclica. El resto de las probetas fueron ensayadas bajo carga cíclica y a partir de esos gráficos se hizo la determinación de Emo (mecánico, no fisurado) y Emf (mecánico fisurado). Finalizado el ensayo de compresión las probetas fueron ensayadas nuevamente con el ultrasonido a fin de determinar Edf (ultrasónico, fisurado). Con los datos obtenidos se trazaron curvas de correlación Velocidad - Resistencia a compresión para ambos tipos de agregados (canto rodado y piedra partida).⁷

4 EVALUACIÓN DEL DAÑO

Para daño escalar la ley tensión-deformación considerando daño elástico puede escribirse como relación secante

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (8)$$

donde σ y ε son valores nominales de tensión axial y deformación específica y E_s designa el módulo de rigidez secante del material dañado. Definiendo el daño como la degradación de las propiedades elásticas, la relación tensión-deformación $\tilde{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ proporciona un índice simple de daño de acuerdo con Lemaitre y Chaboche.^{8, 9, 10}

$$\tilde{E} = (1 - d) E_0 = E_s \quad (9)$$

Es decir que d define el daño en términos de la relación entre los módulos elásticos dañado y no dañado,

$$d = 1 - \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (10)$$

Dado que la velocidad de la onda es proporcional a las propiedades elásticas del material, el daño puede ser medido directamente en términos de la velocidad de la señal ultrasónica a través de la probeta de hormigón dañada y no dañada. Para elasticidad isótropa lineal las velocidades de onda longitudinales están dadas por:

$$v_l^2 = \frac{E_0(1-\nu_0)}{\rho_0(1+\nu_0)(1-2\nu_0)} \quad (11)$$

donde ρ_0, ν_0 son densidad de masa y relación de Poisson del espécimen elástico no dañado de referencia.

La velocidad de la onda longitudinal en el espécimen dañado es:

$$\tilde{v}_l^2 = \frac{\tilde{E}}{\tilde{\rho}} \frac{1-\tilde{\nu}}{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})} \quad (12)$$

Para cargas de hasta el 70 % de la tensión pico es realista asumir que $\tilde{\nu} \approx \nu_0$ y $\tilde{\rho} \approx \rho_0$ dado que el daño consiste principalmente en la difusión de microfisuras emanadas de las interfases entre las dos fases que componen el concreto. En este caso el nivel de daño puede ser determinado directamente a partir de la relación de las velocidades de onda longitudinal en el espécimen dañado y no dañado, por ejemplo

$$d = 1 - \frac{\tilde{v}_l^2}{v_l^2} \quad (13)$$

Esta expresión proporciona una manera muy simple de estimar el daño por medio de mediciones de velocidades ultrasónicas válidas para comportamiento isótropo lineal tanto como $\rho = \rho_0$ y $\nu = \nu_0$.^{7, 8, 9, 10}

4.1 Determinación del módulo de elasticidad

Mecánicamente el módulo E se determina por la pendiente de la curva $\sigma - \epsilon$ 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

$$E_b = 7502 f_{ck}'^{0.4414} \quad (14)$$

Norma Brasileña, NBR 6118 – 2002, en MPa

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}'^{0.5} \quad \text{con} \quad E_c = 0.85 E_{ci} \quad (15)$$

CEB/FIP Model Code - 1991, en MPa

$$E_{ci} = \alpha_E 21500 \left[\frac{f_{ck}' + 8}{10} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

α_E vale 1,2 para basalto; 1,0 para granito; 0,9 para materiales calcáreos; 0.7 para arenito

ACI 318M – 2002, en MPa

$$E_c = 4700 f_c'^{0.5} \quad (17)$$

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.¹¹

5 RESULTADOS

Se consignan a continuación, a modo de ejemplo, curvas $\sigma - \varepsilon$, correspondientes a un ensayo monotónico (Figura 1) y a otro cíclico (Figura 2), a partir de las cuales se determinaron los módulos de elasticidad iniciales y fisurados que permitieron calcular daños mecánico y ultrasónico aplicando las Fórmulas (10) y (13).

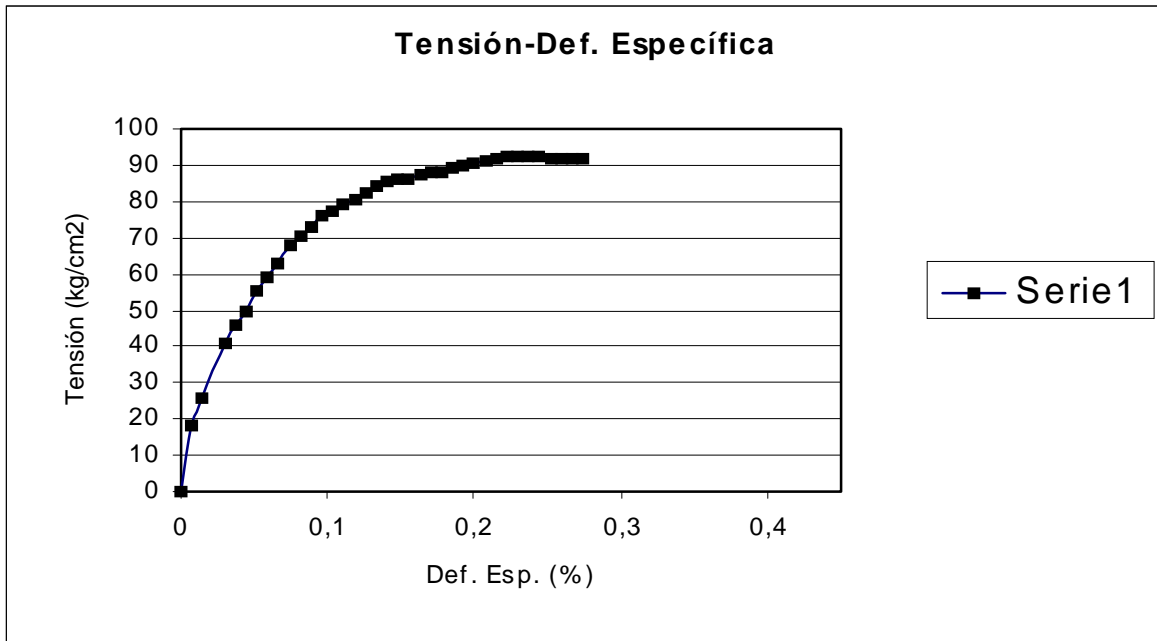


Figura 1 - Curva $\sigma - \epsilon$ con carga monotónica

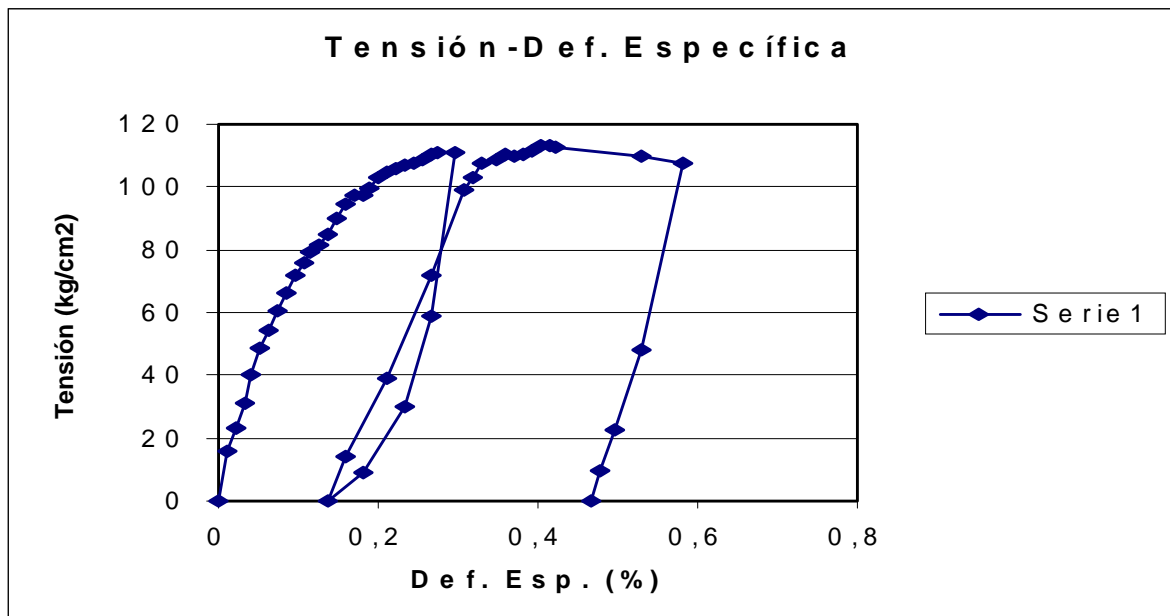


Figura 2 - Curva $\sigma - \epsilon$ con carga monotónica

En las Figuras 3 y 4 se muestran curvas de correlación Resistencia-Velocidad para los

hormigones elaborados con canto rodado y piedra partida respectivamente.

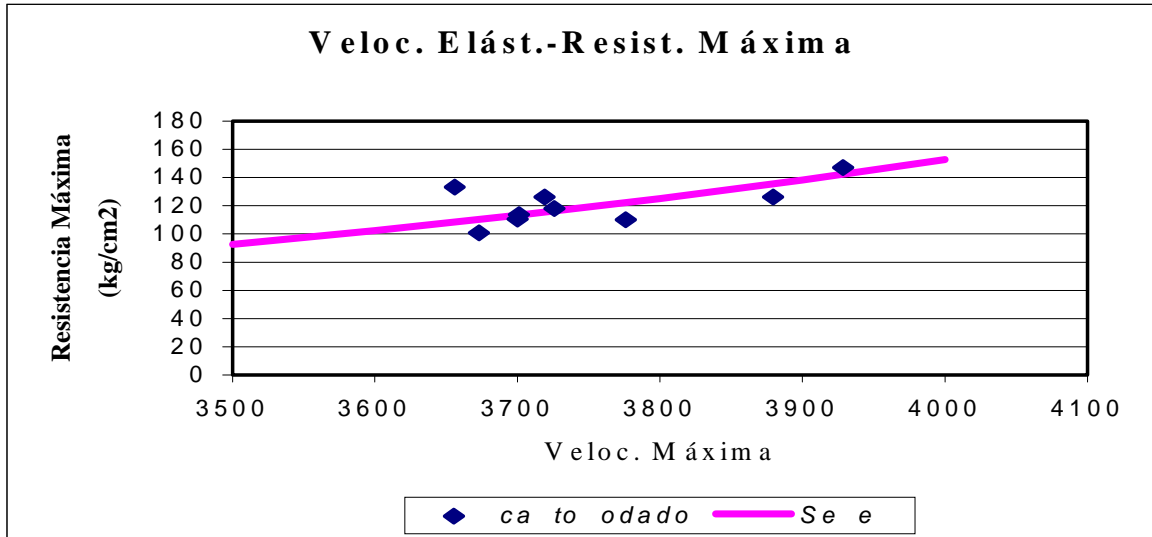


Figura 3 - Correlación Resistencia-Velocidad ($R = 2,8 e^{0,001 v}$)

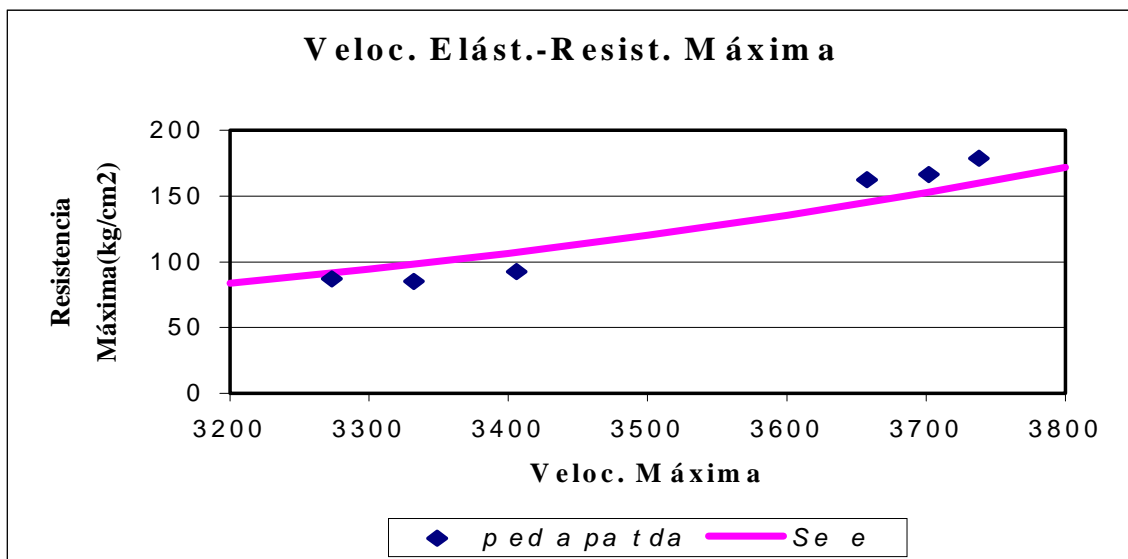


Figura 4 - Correlación Resistencia-Velocidad ($R = 1,8 e^{0,0012 v}$)

En la Tabla 1 se presenta una síntesis de los valores obtenidos para las cuatro series de probetas ensayadas.

Tabla 1: Módulos E y daños mecánicos y ultrasónicos

| Serie | Emo | Edo | Emf | Edf | Daño | Daño |
|---------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | Mecán. Inic. | Dinám. Inic. | Mecán. Fis. | Dinám. Fis. | Mecánico | Ultrasónico |
| Serie 1 | | | | | | |
| | 200000 | 267136.728 | | 207592.114 | | |
| | | | 144871.795 | | 0.27564103 | 0.22289939 |
| Serie2 | 161000 | 293988.336 | | 244742.275 | | |
| | | | 81021.8978 | | 0.4967584 | 0.16751026 |
| Serie 3 | 138986.486 | 226114.938 | | 181992.981 | | |
| | | | 98684.2105 | | 0.28997262 | 0.19513066 |
| Serie4 | 211111.111 | 272650.427 | | 192867.802 | | |
| | | | 148283.019 | | 0.29760675 | 0.29261874 |

6 CONCLUSIONES

La piedra partida utilizada es un esquisto cuarzoso micáceo procedente de la zona oeste de la provincia, con buena dureza en el ensayo Los Ángeles pero con bastante polvo. En cambio, el canto rodado extraído del río Dulce, es un material limpio. Esta circunstancia incide en los valores de resistencia registrados, dado que la microfisura se inicia en la interfase pasta cementicia-agregado. También hay una cuestión relacionada con la trabajabilidad, habida cuenta de las pequeñas dimensiones de las probetas y los correspondientes problemas de llenado y compactado. Esto justifica que la serie 4, con mayor relación a/c, haya arrojado mejores valores de resistencia, resultado consistente con una mayor densidad consecuencia de un mejor llenado. Los valores de daño mecánico y ultrasónico calculados se compadecen con esta situación. Para la correlación entre Resistencia y Velocidad se han considerado por separado ambos agregados y se ha recurrido a una expresión del tipo $R = a e^{bV}$ de buen acuerdo con la nube de puntos obtenida.

7 REFERENCIAS

- [1] Resnick & Halliday, *Física*,
- [2] D. R. Askeland, *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Grupo Editorial Iberoamérica
- [3] . Flinn y P. Trojan , *Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones*, McGraw Hill
- [4] *Manual de Usuario Controls*
- [5] R. Jones, L. Facaoaru, I., *Recommendations For Testing Concrete By The Ultrasonic Pulse Method*
- [6] S. Popovics, J. L. Rose, J. S. Popovics, *The Behavior Of Ultrasonic Pulses In Concrete*
- [7] Radakovic, Z., Willam, K., Bond, L. J. *Ultrasonic Assessment Of Concrete In Uniaxial Compression*, Thesis for the Doctor of Philosophy, University of Colorado
- [8] J. Lemaitre y J. L. Chaboche, *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press

- [9] Y. Berthauld, *Damage Measurements in Concrete via an Ultrasonic Technique. Part I: Experiment*, Cement and Concrete Research
- [10] Y. Berthauld, *Damage Measurements in Concrete via an Ultrasonic Technique. Part II: Modeling*, Cement and Concrete Research
- [11] Noemí G. Maldonado y Miguel E. Tornello, *Módulo de elasticidad en el Proyecto CIRSOC 201-02 y su importancia en las estructuras de hormigón armado*, CeReDeTec, UT, Facultad Regional Mendoza