

## **SIMULACION DE UNA PLACA DE HORMIGÓN SOMETIDA A CARGAS EXPLOSIVAS**

**Bibiana Luccioni, Mariela Luege, Rodolfo Danesi**

CONICET, Laboratorio. de Estructuras - Universidad Nacional de Tucumán

Av. Roca 1800 – 4000 S.M. de Tucumán, Argentina

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se presentan los resultados de la simulación numérica de una placa rectangular de hormigón apoyada sobre el suelo y sometida a cargas explosivas. La misma fue ensayada con cargas explosivas de distinta magnitud suspendidas.

La acción se simuló mediante una presión dependiente del tiempo y de la posición, teniendo en cuenta el retardo en la llegada del frente de onda, la variación del pico de la sobrepresión y la variación de la duración de la fase positiva de la acción con la distancia al explosivo, de acuerdo a las fórmulas empíricas clásicas.

Para la integración en el tiempo de las ecuaciones de campo, se probaron dos tipos de métodos: un esquema implícito de Newmark y un esquema explícito de tipo diferencias centrales.

Luego de una breve descripción del ensayo realizado, se presenta la simulación numérica del mismo. Finalmente se comparan los resultados numéricos con los experimentales.

### **INTRODUCCION**

Estudios realizados en los últimos años han demostrado que las cargas de corta duración y gran magnitud, y los efectos inerciales asociados, tienen una gran influencia sobre la respuesta, pudiendo modificar sustancialmente las propiedades del material. En particular, el comportamiento mecánico del hormigón bajo cargas de tipo explosivo se caracteriza por: una respuesta diferenciada en tracción y en compresión, la degradación progresiva de las propiedades elásticas del material acompañada de deformaciones permanentes crecientes, y la dependencia de la resistencia, rigidez y energía de fractura de la velocidad de deformación. En la bibliografía, este último aspecto ha sido abordado, en general, considerando modelos viscoplásticos o de daño dependientes del tiempo [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Sobre el tema particular de placas de hormigón, sometidas a cargas de tipo explosivo, merece destacarse los antecedentes relativos al análisis último mencionados por Lubliner [7], y los trabajos realizados por Yi [8].

En este trabajo se comparan los resultados experimentales de explosiones realizadas sobre losas de hormigón apoyadas en el suelo con los obtenidos mediante un programa de elementos finitos.

### **DESCRIPCION DEL ENSAYO**

En la Fig.1 se muestran las dimensiones de la placa ensayada. La misma se construyó apoyada en el suelo con una armadura constructiva de hierro de 4.2 mm de diámetro cada 15 cm en ambas direcciones.

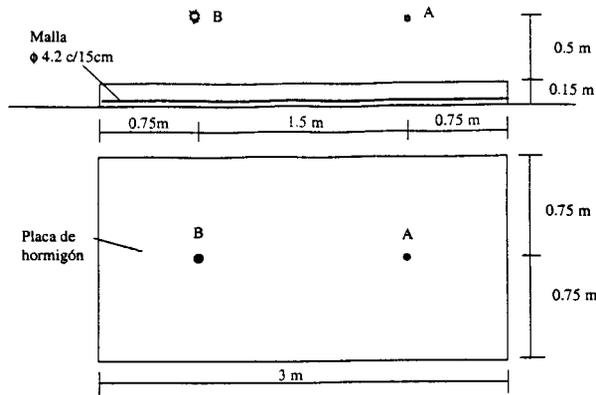


Figura 1. Esquema de la placa de hormigón y de las cargas aplicadas

La Fig.1 muestra la ubicación de las cargas explosivas sobre la losa de hormigón. Se utilizaron 5 Kg y 12.5 kg de Gelamón VF80, dispuestos a 0.50m de altura.

Las Fig. 2ª y 2b muestran los mapas de fisuración registrados luego de realizar los ensayos.

En un diámetro de 25cm, es interesante observar el disgregamiento del hormigón que generó la carga de 5 Kg de Gelamon. Para el caso de 12,5 Kg, el diámetro de la zona de disgregamiento resultó de 30cm. En el primer ensayo se produjo una fractura de la placa aproximadamente paralela al lado menor, por lo cual, en los ensayos subsiguientes, el conjunto trabajó prácticamente como dos placas cuadradas independientes. Por otro lado, en todos los casos se produjeron fisuras circunferenciales alrededor de la zona de disgregamiento. Dichas fisuras definieron dos circunferencias. La primera de ellas tuvo un diámetro aproximado de 1.0m y la segunda de ellas resultó prácticamente coincidente con el borde de la placa y con el centro de la misma. Es clara también la aparición de fisuras radiales, fundamentalmente paralelas a los lados.

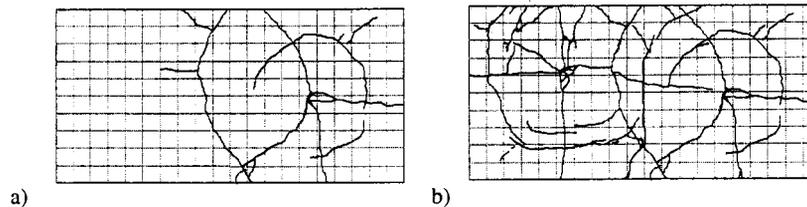


Fig. 2 Cuadro de fisuración al terminar: a) Ensayo N°2; b) Ensayo N°3

Una vez terminado los ensayos, se midieron los desplazamientos verticales relativos máximos de la placa, en correspondencia con la vertical de la carga, registrándose 2.3 cm en la posición A, y 7.5cm en la posición B.

#### ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

El análisis de la placa ensayada fue realizado con los programas Abaqus Standard versión 5.8-18 y Abaqus Explicit versión 5.8-18.

En la Fig.3 se muestra la malla de elementos finitos utilizada. La placa se modeló con 1000 elementos tridimensionales de tipo C3D8R. Se consideró la armadura formada por barras de acero distribuidas en la segunda capa de la losa en ambas direcciones [9].

Para el suelo se utilizó una combinación de elementos tridimensionales C3D8R y elementos tridimensionales semi-infinitos CIN3D8. Estos últimos representan bordes suaves para el suelo que son capaces de transmitir energía fuera de la malla de elementos finitos sin atraparla o reflejarla.

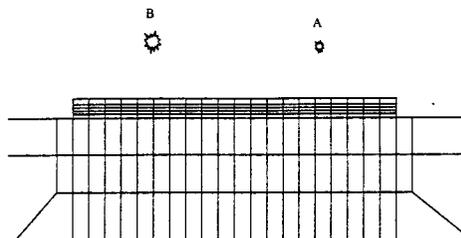


Fig.3 Malla de elementos finitos

Para los materiales intervinientes se utilizaron modelos constitutivos simples que permitieran obtener una respuesta global aproximada del conjunto con un mínimo de parámetros. En una primera etapa, no se tuvo en cuenta la influencia de la velocidad de la carga en el comportamiento de los materiales [6]. A continuación, se resumen las principales características mecánicas de los materiales utilizadas en el análisis:

**Hormigón:** Comportamiento elastoplástico. Densidad=2400Kg/m<sup>3</sup>; Módulo de elasticidad= 2.5 E4 MPa; Coeficiente de Poisson= 0.15; Tensión límite elástica en compresión= 18 MPa; Tensión máxima de compresión: 20 MPa; Angulo de Fricción interna=30°, Angulo de dilatación=20°.

**Acero:** Comportamiento elasto plástico con endurecimiento lineal; Densidad= 7800Kg/m<sup>3</sup>; Módulo de elasticidad=2.1 E5 MPa; Coeficiente de Poisson=0.2; Tensión de fluencia=480 MPa.

**Suelo:** Elastoplástico; Densidad= 1200Kg/m<sup>3</sup>; Módulo de elasticidad: 100 MPa; Coeficiente de Poisson: 0.3; Cohesión=0.11 MPa; Angulo de Fricción interna=20°.

La carga explosiva se modeló como una presión en función de la posición y del tiempo que tiene en cuenta el tiempo de arribo del pico de presión, la disminución del mismo con la distancia al explosivo y la caída exponencial con el tiempo [10]. Las expresiones utilizadas fueron las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= 0 & t < t_0 \\
 p(t) &= (p_r - p_s) \left( 1 - \frac{t-t_0}{t-t'-t_0} \right) + p_s \left[ 1 - \frac{t-t_0}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{b(t-t_0)}{T_s} \right\} & t_0 < t < t_0 + t' \\
 p(t) &= p_s \left[ 1 - \frac{t-t_0}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{b(t-t_0)}{T_s} \right\} & t > t_0 + t'
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{1.4072}{Z} + \frac{0.5540}{Z^2} - \frac{0.0357}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4} \text{ [MPa]} & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\
 p_s &= \frac{0.6194}{Z} - \frac{0.0326}{Z^2} + \frac{0.2132}{Z^3} \text{ [MPa]} & 0.3 \leq Z \leq 1.0 \\
 p_s &= \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3} \text{ [MPa]} & 1.0 \leq Z \leq 10
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}; p_r = 2p_s \left( \frac{7p_o + 4p_s}{7p_o + p_s} \right); t' = 3S/U_s; U_s = \sqrt{\frac{6p_s + p_o}{7p_o}} a_o; t_o = R/U_s \quad (3)$$

Donde  $R$  es la distancia al explosivo;  $W$ : Masa del explosivo [Kg de TNT];  $Z$  la distancia escalada;  $p$  la presión;  $p_s$  la sobrepresión en el frente de onda;  $p_r$  la presión reflejada;  $p_o$  la presión atmosférica;  $t$  el tiempo;  $t_o$  el tiempo de arribo de la sobrepresión;  $T_s$  la duración de la fase positiva de la sobrepresión que puede ser obtenida de ábacos en función de  $Z$  [10];  $t'$  tiempo de incidencia de la presión reflejada;  $b$  parámetro de forma de onda que depende de  $p_s$ ;  $U_s$  velocidad de avance del frente de onda;  $a_o$  velocidad del sonido;  $S$  menor de las siguientes dimensiones: Ancho/2 ó altura.

En primer lugar se realizó un análisis dinámico con integración directa implícita. Luego se realizó un análisis dinámico explícito, basado en una regla de integración de diferencias finitas centrales, el cual es especialmente apropiado para acciones impulsivas y respuestas fuertemente discontinuas. El método de diferencias centrales es condicionalmente estable; el límite de estabilidad del operador de diferencias centrales depende de la frecuencia más alta del sistema. El programa hace una estimación elemento por elemento del incremento de tiempo para el cual la solución resulta estable. Sin embargo, dado que se trata de un problema fuertemente no lineal, para mejorar la solución fue necesario trabajar con incrementos fijos del orden de  $1/20$ , respecto del obtenido en dicha estimación.

En las Figs.4 se ha representado la deformación amplificada de la placa después de cada uno de los tres ensayos. Los desplazamientos máximos registrados corresponden a los puntos bajo las cargas y resultan de 1.9 cm y 4.0 cm.

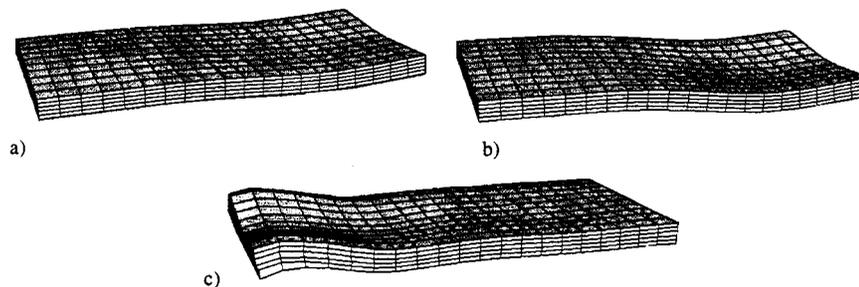


Fig. 4 Deformación de la placa. a) Ensayo No.1; b) Ensayo No.2; c) Ensayo N°3

registrado experimentalmente.

En la Fig. 6 se ha representado la distribución de tensiones máximas durante el primer ensayo, pudiéndose comprobar la coincidencia de las zonas traccionadas con las fisuras circunferenciales externas observadas experimentalmente.

Los valores obtenidos para las tensiones y deformaciones en las armaduras inferiores indican que las mismas alcanzaron la fluencia en correspondencia con la fisura circunferencial interna, lo cual confirma el mecanismo de colapso observado experimentalmente.

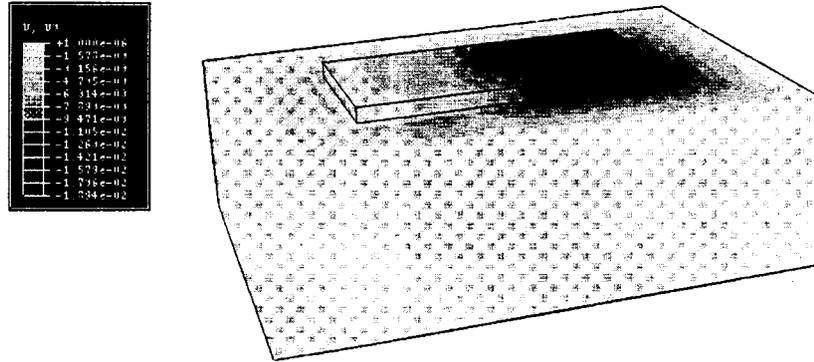


Fig.5 Distribución de desplazamientos verticales [m] al finalizar el segundo ensayo

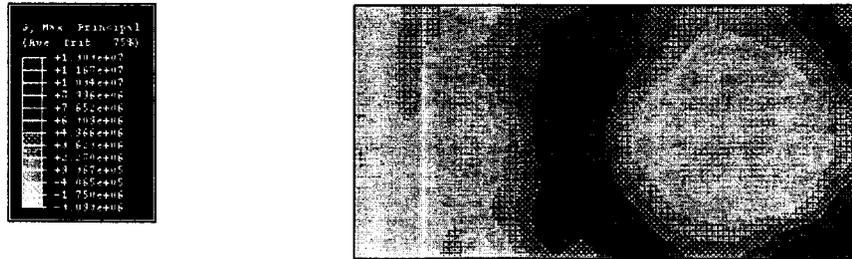


Fig.6 Distribución de tensiones máximas en la cara superior [Pa] (Ensayo N°1)

### CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados del estudio numérico de una placa de hormigón sometida a cargas explosivas. De dicho análisis, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

El método de elementos finitos permite obtener con bastante buena aproximación el comportamiento de la losa ensayada bajo cargas explosivas. Para este tipo de acciones es imprescindible trabajar con una integración explícita en el tiempo. Si bien el número de incrementos de tiempo necesario fue del orden de 70.000, el tiempo de cálculo requerido para simular los tres ensayos en una PC Pentium II de 350MHz fue de 1.5hrs.

Debido a su baja rigidez en relación con la del hormigón, el suelo no altera prácticamente el trabajo como placa de la losa. La forma de rotura es aproximadamente coincidente con la de una losa circular simplemente apoyada, de diámetro igual a la menor dimensión de la placa. Los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos permiten verificar la deformación y la forma de rotura resultante.

Si bien los modelos constitutivos utilizados para los materiales son bastante sencillos, permiten obtener una respuesta del conjunto similar a la observada experimentalmente. La limitación más grande de los modelos utilizados es la imposibilidad de simular fisuras discretas. En particular no se pudo lograr la separación en dos partes de la placa, resultando que para la tercera carga (12.5kg), en el cálculo por elementos finitos se obtuvo una deformación de la placa menor que la real. El modelo utilizado para el suelo no tiene prácticamente influencia en el comportamiento de la losa.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Ambrosini y al Ing. Jacinto que tuvieron a su cargo la responsabilidad de los ensayos, al señor Sergio Salomón que facilitó el predio para la realización de los mismos y al CONICET y a la Universidad Nacional de Tucumán por el apoyo económico brindado.

### REFERENCIAS

- [1] Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich, J. W., Don Simons, *A plasticity concrete material model for DYNA3D* International Journal Impact Engineering, Vol. 19, Nos. 9-10, 1997, págs. 847-873.
- [2] Comi, C., Perego, *On visco-damage models for concrete at high strain rates*, Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, D.R.J. Owen, Oñate and E. Hinton (Eds.), CIMNE, Barcelona, 1997.
- [3] Dubé, J. F., Pijudier Cabot, G., *Rate Dependent Damage Model for Concrete in Dynamics*, Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol 122, No. 10, 1996, págs. 939-947.
- [4] Sercombe, J., F.-Ulm, J., *Viscous hardening plasticity for concrete in high rate dynamics*, Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, D.R.J. Owen, Oñate and E. Hinton (Eds.) CIMNE, Barcelona, 1997.
- [5] Sercombe, J., F.-Ulm, J., Toutlemonde, *Viscous hardening plasticity for concrete in high rate dynamics*, Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 9, September 1998, págs. 1050-1057.
- [6] Luege, M., *Simulación y análisis de materiales bajo cargas explosivas*, Tesis de Magister en Ingeniería Estructural, Universidad Nacional de Tucumán, 1999.
- [7] Lubliner, J., *Plasticity theory*, Mc. Millan Publishing U.S.A., 1990.
- [8] Yi, P., *Explosionseinwirkungen auf Stahlbetonplatten*, Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 1991.
- [9] ABAQUS/ *Standard User's Manual*, Version 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.
- [10] Smith, P.D., Hetherington, J.G. *Blast and ballistic loading of structures*, Butterworth Heinemann Ltd, Great Britain, 1994.