

ANALISIS COMPUTACIONAL Y EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA DE PLACAS METALICAS SOMETIDAS A CARGAS EXPLOSIVAS

Abel C. Jacinto, Ricardo D. Ambrosini, Rodolfo F. Danesi
Laboratorio de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán
Casilla de Correo 134, Correo Central, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es la determinación de la respuesta dinámica de placas metálicas sometidas a la acción de cargas impulsivas originadas por explosiones. Las cargas dinámicas de corta duración exhiben a menudo grandes variaciones espaciales y temporales produciendo severos gradientes de tensión en la estructura. Estas altas tasas de deformación también afectan la resistencia y ductilidad de los materiales y de la estructura global, así como los modos de falla.

Dentro del programa experimental, se ensayaron dos placas metálicas no rigidizadas, con distintas condiciones de borde: una empotrada en el suelo y la otra empotrada en los cuatro bordes. Se registró la variación temporal de la aceleración de ambas placas en distintos puntos y la presión generada por la onda explosiva en los puntos de ubicación de las mismas. Por otra parte, se realizó una modelación computacional dinámica lineal de ambas placas, con los programas ABAQUS y COSMOS/M. Por último, se realizó un análisis dinámico no lineal de la primera placa, considerando la no linealidad geométrica (grandes desplazamientos) involucrada en el problema.

Del contraste entre los resultados numéricos y experimentales surgen recomendaciones importantes para la modelación del fenómeno de cargas impulsivas.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to determine the dynamic response of steel plates subjected to impulsive loads originated by explosions. The dynamic loads of short duration often exhibit high space and temporal variations producing severe gradients of stress in the structure. These high rates of deformation also affect the resistance and ductility of the materials and the global structure, as well as the failure modes.

In the experimental program, two unstiffened metallic plates were tested, with different boundary conditions: one clamped on the floor and another clamped on the four edges. The time variation of the acceleration of both plates in different points was registered as well as the incident pressure on the plates. On the other hand, a dynamic computational linear analysis of the plates was carried out, with ABAQUS and COSMOS/M. A dynamic nonlinear analysis of the first plate was performed, taking into account the geometric nonlinearity involved in the problem.

Comparing the numerical and experimental results, important recommendations arise for the modelling of the phenomenon of impulsive loads.

INTRODUCCION

Los explosivos se utilizan, en la actualidad, como una herramienta de precisión para la excavación, para dar forma a excavaciones subterráneas dejando inalterada a la roca y para dar forma a los metales en variadas aplicaciones. El uso apropiado del poder explosivo puede ahorrar grandes cantidades de dinero, tanto en la realización de

excavaciones como en la reparación de edificios dañados. Para ello se requiere conocer los fundamentos del funcionamiento de los explosivos.

Por otro lado, las cargas explosivas han concitado interés en los últimos años debido a diversos sucesos, accidentales o intencionales, sobre estructuras civiles importantes en diversos lugares del mundo.

En las últimas década hubo una intensa actividad en investigación en el campo de cargas explosivas. Inicialmente, dichos trabajos fueron principalmente empíricos. Sin embargo, en los últimos años han comenzado a desarrollarse trabajos de investigación más profundos e importantes.

La detonación de un explosivo genera la expansión violenta de gases calientes originando una onda de presión, que se mueve hacia afuera desde el lugar de detonación a alta velocidad. Cuando el frente de presión arriba al punto de observación se observa un brusco aumento de la presión y una posterior succión, como se ve en la figura 1 (medición experimental). La fase negativa de la onda de presión es usualmente de mayor duración que la fase positiva. El valor pico de la presión negativa es pequeño comparado con el valor de la sobrepresión positiva pico. Cuando el frente de onda arriba a un punto dado comienza un viento transitorio, que origina una presión dinámica proporcional al cuadrado de la velocidad del viento y a la densidad del aire detrás del frente de presión. Por último, cuando la onda de presión alcanza un medio más denso (tierra, agua, muro) se genera una onda reflejada. El valor del pico de presión reflejada dependerá del valor de la onda incidente y el ángulo al cual ésta alcanza la superficie. La naturaleza de la superficie también tiene un efecto importante.

Los métodos de análisis estructural comúnmente usados pueden dividirse en tres categorías: Métodos de un solo grado de libertad (SDOF), métodos de varios grados de libertad (MDOF) y métodos numéricos de propósito general. Hay varios métodos simples SDOF en libros clásicos de dinámica estructural como en Biggs¹ y Clough y Penzien² y también en el trabajo de Krauthammer et al³. En el caso de un análisis más riguroso, la estructura se modela como un sistema de múltiples grados de libertad y se resuelve la ecuación de movimiento usando superposición modal o técnicas de integración directa. En los casos en que existe diferencia entre las rigideces de las partes componentes de un sistema (estructura resistente y paneles de cierre) es posible desacoplar las mismas y analizarlas separadamente (Autoridad Regulatoria Nuclear)⁴.

Las cargas dinámicas asociadas con explosiones provocan severas velocidades de deformación en el material, del orden de 10^{-1} a 10^3 seg^{-1} . Esas cargas extremas producen un comportamiento especial de los materiales afectados, siendo su principal característica grandes sobrerresistencias y aumento de la rigidez. Con relación al comportamiento de los metales pueden mencionarse los trabajos de Galiev⁵ y Krauthammer et al⁶.

Las cargas originadas por explosiones son del tipo impulsivo. En estos casos, a veces, es necesario para el análisis tener en cuenta los efectos de no-linealidad material y geométrica. Existen métodos basados en la ecuación de Lagrange, como el propuesto por Louca et al⁷, que permiten realizar un análisis elástico con grandes desplazamientos. En general, los análisis teóricos consideran condiciones de borde simples, y para modelar condiciones de apoyo semirrígidas se recurre al uso de resortes. En el trabajo de Ellis y Tsui⁸ se presenta una alternativa para determinar el valor de rigidez de los mismos.

Para la realización de ensayos, es de fundamental importancia la utilización de técnicas confiables y seguras para lo que resulta adecuado el libro de Tuñón Suárez⁹ y el trabajo de Formby y Wharton¹⁰. Además, es una forma usual de trabajo, referir todos los explosivos utilizados a una cantidad equivalente de TNT, para lo cual resultan muy útiles las tablas dadas en el trabajo mencionado de Formby y Wharton.

En este trabajo se analiza la respuesta de placas metálicas sometidas a la acción de cargas impulsivas, utilizando los programas de elementos finitos ABAQUS/Standard¹¹ y COSMOS/M¹². Se realiza un análisis dinámico lineal, considerando pequeños y grandes desplazamientos.

DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Las estructuras analizadas en este trabajo son dos placas de acero no rigidizadas sometidas a cargas impulsivas, originadas por la detonación de cargas explosivas. El explosivo utilizado es Gelamón VF80 con una equivalencia

de 0.8 de TNT en valor fuerza. El Ensayo 1 correspondió a una carga equivalente a 0.8 Kg de TNT y el Ensayo 2 a 1 Kg de TNT. Además se realizaron otra serie de ensayos con 10 Kg de TNT cuyos resultados serán analizados en trabajos posteriores.

Los valores de presión medidos experimentalmente se utilizaron como carga para realizar el análisis computacional de las placas. La figura 1 muestra uno de los registros, correspondiente al Ensayo 1.

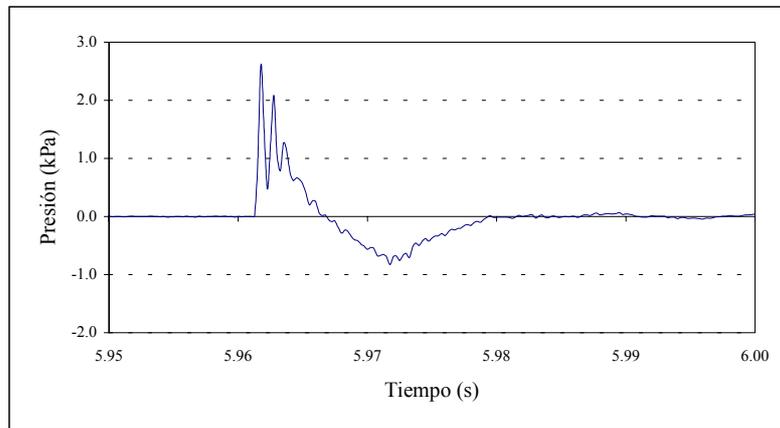


Figura 1. Registro experimental de presión reflejada.

Placa metálica empotrada en la base (Placa A)

La placa se empotró en su parte inferior a una base de hormigón de 1.2 x 1.0 x 0.4 m. Las dimensiones de la misma eran 1.0 x 1.5 m. y 2.1 mm. de espesor. En la figura 2 se observa un esquema de la misma y se indican los puntos donde se ubicaron los acelerómetros durante los ensayos. Para el Ensayo 1, los acelerómetros se ubicaron en las posiciones 1 y 2. Para el Ensayo 2, se agregó un tercer acelerómetro en la posición 3 (Figura 2).

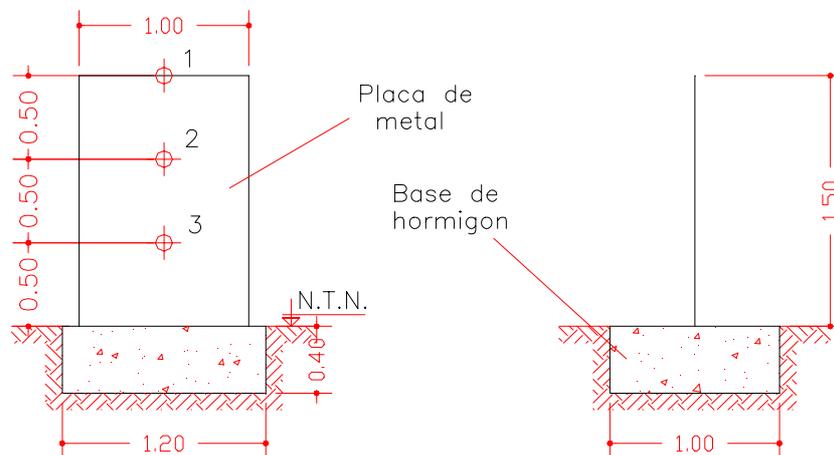


Figura 2. Esquema de la Placa A.

Placa metálica empotrada en los cuatro bordes (Placa B)

La placa se sujetó en los cuatro bordes a un marco construido con perfiles normales INP 100, empotrado a bases de hormigón de 0.20 x 1.25 x 0.30 m. Las dimensiones de la misma eran 0.95 x 0.95 m. y 0.9 mm. de espesor. En el Ensayo 1 el acelerómetro se ubicó en el centro de la placa (Figura 3).

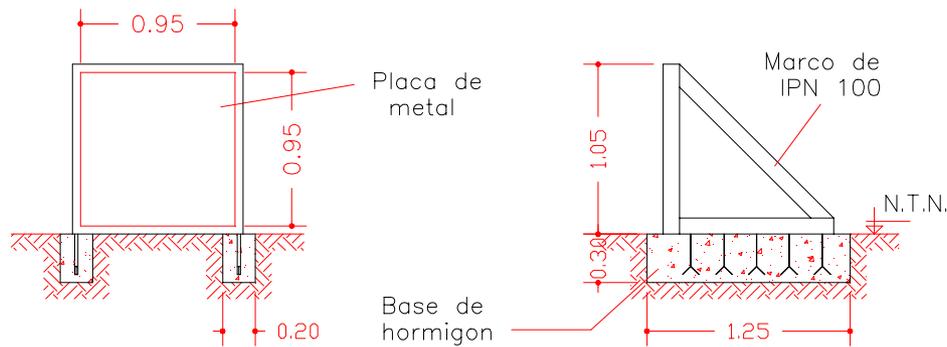


Figura 3. Esquema de la Placa B.

ANÁLISIS NUMÉRICO

Para llevar a cabo el análisis numérico se utilizaron los programas de elementos finitos ABAQUS/Standard y COSMOS/M. Las placas se modelaron utilizando elementos tipo shell, de cuatro nodos. En ambos casos, las condiciones de borde se consideraron como un empotramiento perfecto. Para las propiedades materiales se adoptó un módulo de Young $E = 180$ GPa (obtenido experimentalmente), una relación de Poisson $\nu = 0.3$, y una densidad $\rho = 7850$ kg/m³.

El análisis dinámico se llevó a cabo por el método de superposición modal y por el método de integración directa. En ambos casos, para la integración paso a paso en el tiempo, se utilizó el método Newmark- β ($\beta = 1/4$ y $\gamma = 1/2$). Se determinó la aceleración en los nodos que se corresponden con la posición de los acelerómetros en los ensayos.

Para la inclusión de la carga en el análisis numérico se utilizaron los registros medidos experimentalmente que fueron obtenidos en el punto de ubicación espacial de las placas, por lo que puede suponerse que fue la carga efectivamente actuante sobre las mismas.

Placa metálica empotrada en la base

La figura 4 muestra el modelo de 150 elementos utilizado para modelar la Placa A. El coeficiente de amortiguamiento utilizado, medido experimentalmente fue de 0.002, que coincide con los valores encontrados en la literatura para el acero.

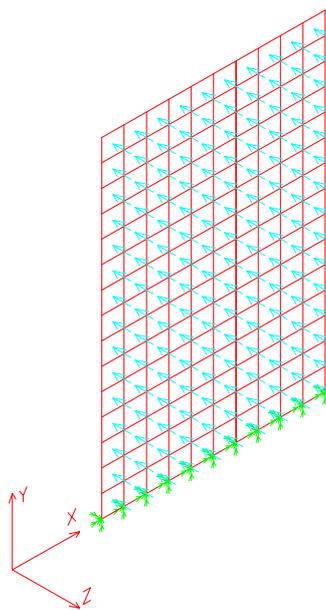


Figura 4. Modelo de la Placa A.

Para el cálculo de la respuesta usando superposición modal, se consideraron las primeras 30 formas modales. En las figuras 5 y 6 se muestran los resultados numéricos obtenidos usando los programas COSMOS/M y ABAQUS para el Ensayo 1, en la posición 1 y 2 respectivamente.

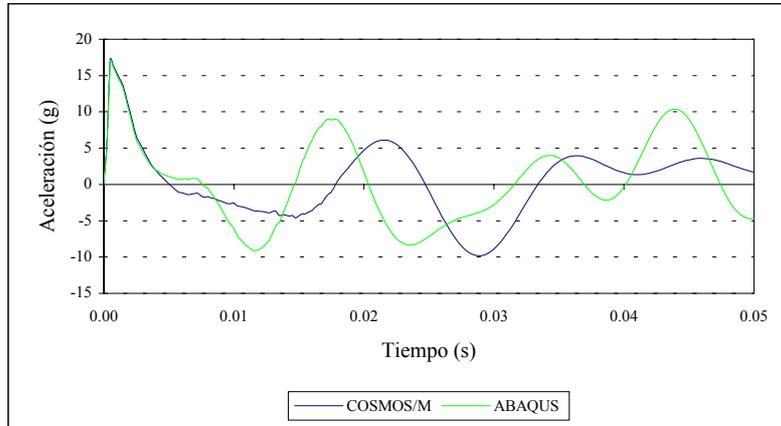


Figura 5. Resultados numéricos para el Ensayo 1. Posición 1.

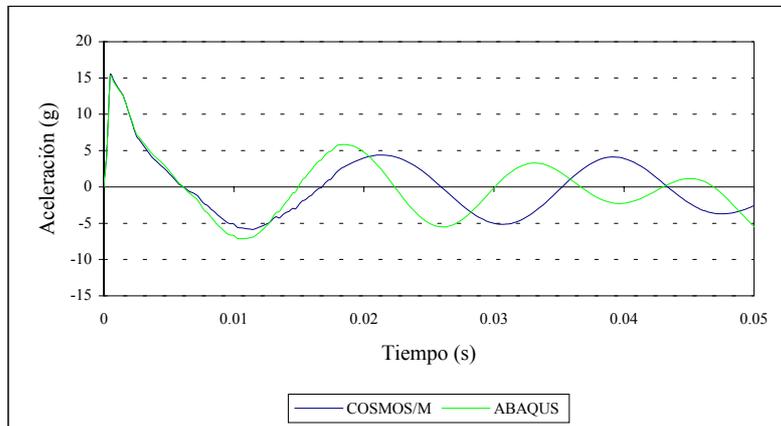


Figura 6. Resultados numéricos para el Ensayo 1. Posición 2.

Para el análisis por integración directa, se tuvo en cuenta el efecto de no-linealidad geométrica. En este caso, los elementos son formulados en la configuración actual (formulación Euleriana) y se tiene en cuenta la distorsión desde su forma original a medida que se incrementa la deformación. Para este análisis, sólo se utilizó el programa ABAQUS. En la figura 7 se indican los resultados obtenidos para el Ensayo 1.

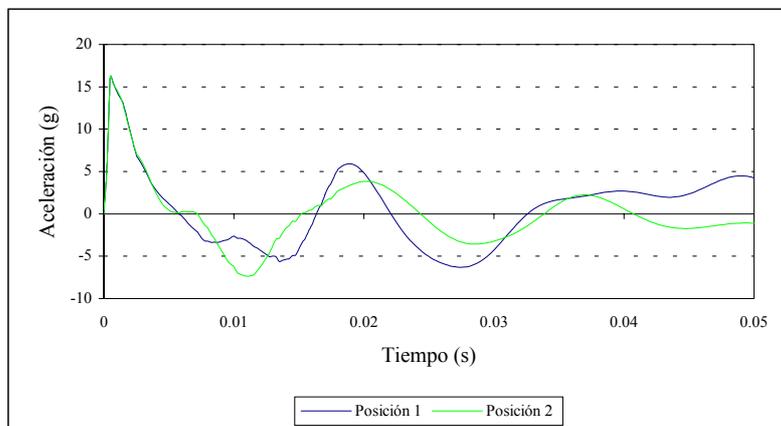


Figura 7. Resultados numéricos para el Ensayo 1.

Placa metálica empotrada en los cuatro bordes

En la figura 8 se observa el modelo de 100 elementos que se usó para modelar la Placa B. El coeficiente de amortiguamiento determinado experimentalmente fue 0.05. La diferencia de un orden de magnitud con el amortiguamiento del material se puede explicar por el efecto del "amortiguamiento de contorno" debido a la disipación de energía en la unión placa-marco (Woodhouse¹⁵).

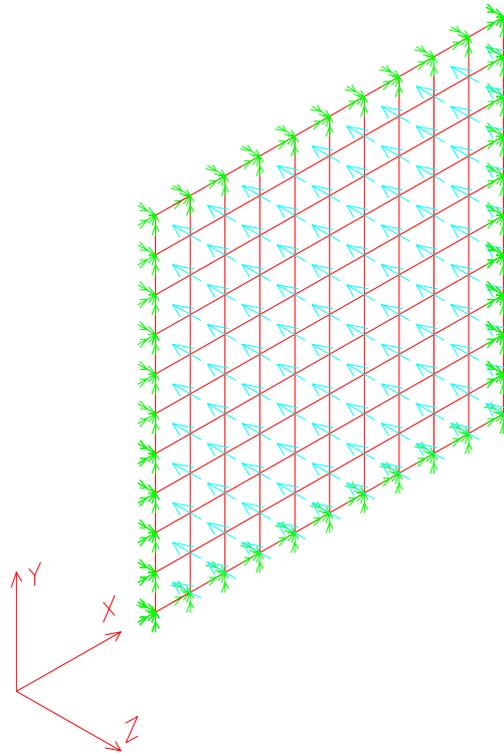


Figura 8. Modelo de la Placa B.

Se determinó el valor de la aceleración en el centro de la placa, utilizando el método de superposición modal. Se realizó el análisis considerando 16 y 20 formas modales. La figura 9 muestra los valores de aceleración obtenidos para el centro de la placa utilizando el programa ABAQUS.

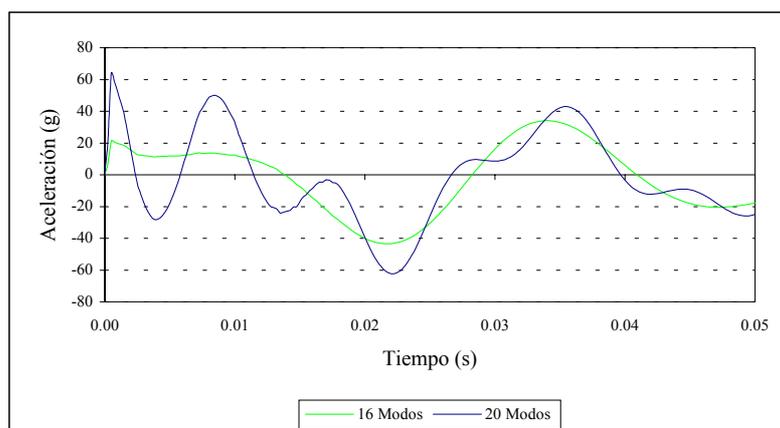


Figura 9. Resultados numéricos para el Ensayo 1.

ANALISIS EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en las cercanías de la localidad de las Cejas, dentro del territorio de la Provincia de Tucumán. Es una zona plana, sin formaciones rocosas; normalmente destinada a la agricultura.

Uno de los objetivos del análisis experimental fue la determinación de la aceleración en distintos puntos de las placas y el registro de la variación temporal de la presión en correspondencia con la posición de las mismas. El sistema de medición utilizado en este análisis consta básicamente de transductores de presión y acelerómetros. Los distintos tipos de sensores se escogieron en función de los cálculos numéricos previos, donde se determinó el orden de magnitudes a medir. Para el registro de la aceleración se utilizaron acelerómetros marca KYOWA, conectados a un amplificador de deformación dinámica KYOWA, modelo DPM-600. Los sensores de presión 180PC son de tipo diferencial, marca Honeywell. Los datos se registraron a través de una placa diferencial de 8 canales PCM-DAS16/16, marca ComputerBoards¹³. El programa de adquisición de datos se desarrolló usando el lenguaje HPVEE 5.0¹⁴.

Placa metálica empotrada en la base

En las figuras 10 y 11 se muestran los registros de las aceleraciones en las distintas posiciones, correspondientes a cada uno de los ensayos analizados.

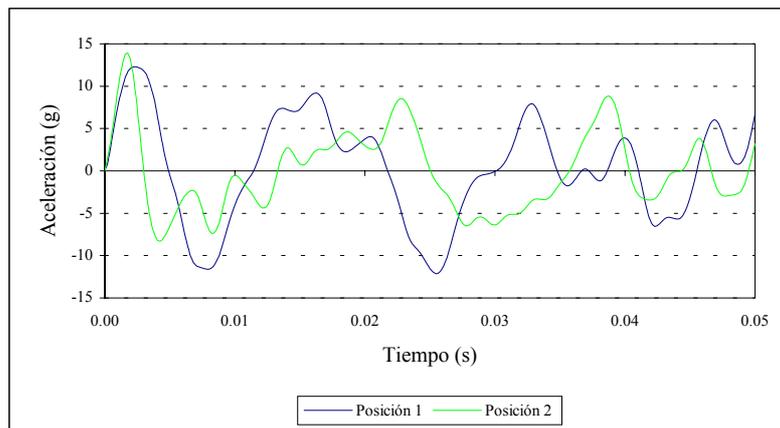


Figura 10. Registros de aceleración del Ensayo 1.

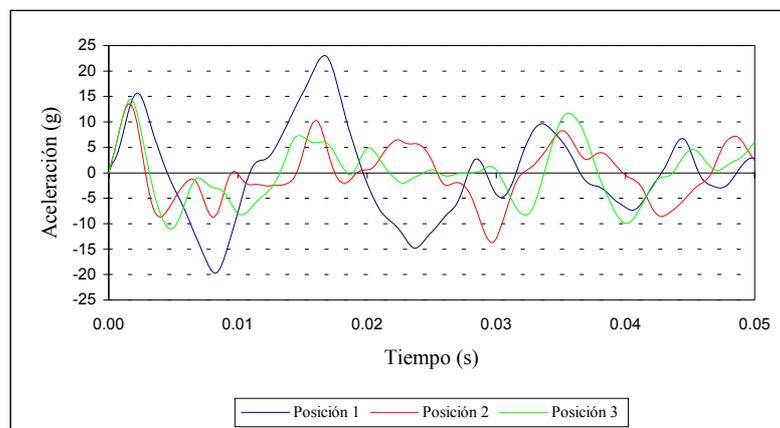


Figura 11. Registros de aceleración del Ensayo 2.

Placa metálica empotrada en los cuatro bordes

La figura 12 muestra el registro de aceleración en correspondencia con el centro de la Placa B. Los valores corresponden al Ensayo 1.

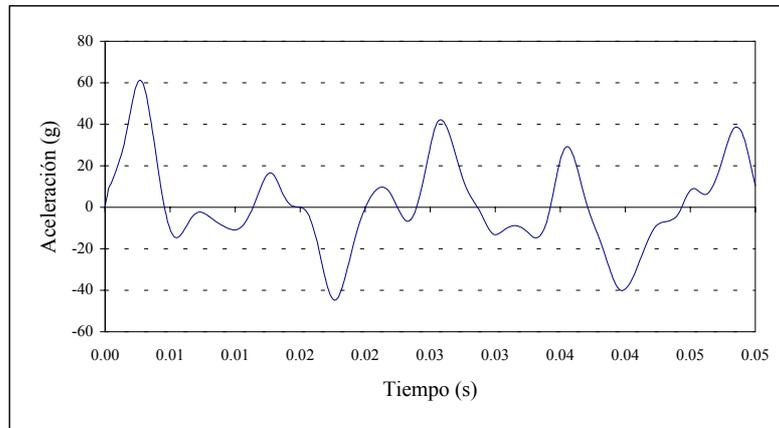


Figura 12. Registro de aceleración del Ensayo 1.

COMPARACION DE RESULTADOS

En las siguientes figuras se realiza una comparación entre los resultados computacionales y los valores obtenidos experimentalmente.

En la figura 13 se comparan los valores de aceleración obtenidos experimentalmente con los determinados computacionalmente para la posición 1 de la Placa A. En este caso, los valores numéricos se obtuvieron con el método de superposición modal.

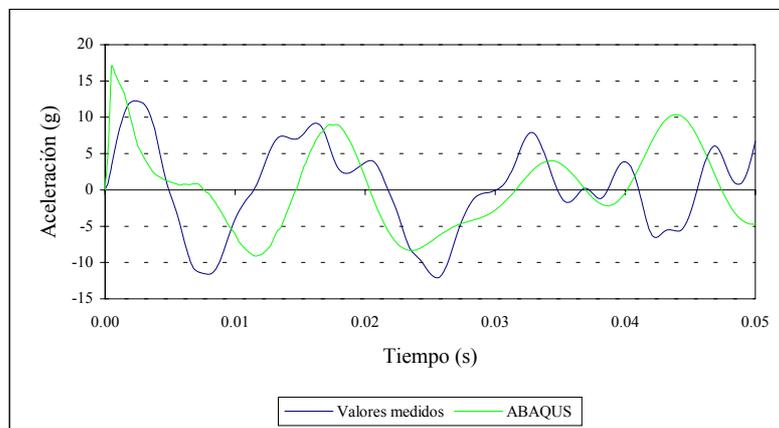


Figura 13. Aceleración de la Placa A para el Ensayo 1. Superposición modal.

En la figura 14, los valores calculados para la posición 1 de la Placa A corresponden al análisis por el método directo con el programa ABAQUS, considerando el efecto de no linealidad geométrica.

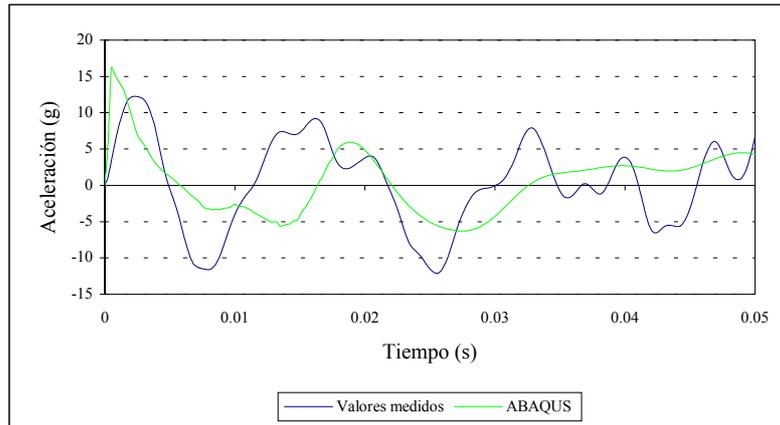


Figura 14. Aceleración de la Placa A para el Ensayo 1. Integración Directa.

En la figura 15 se compara el registro experimental de aceleración en el centro de la Placa B, con la curva obtenida utilizando el programa ABAQUS.

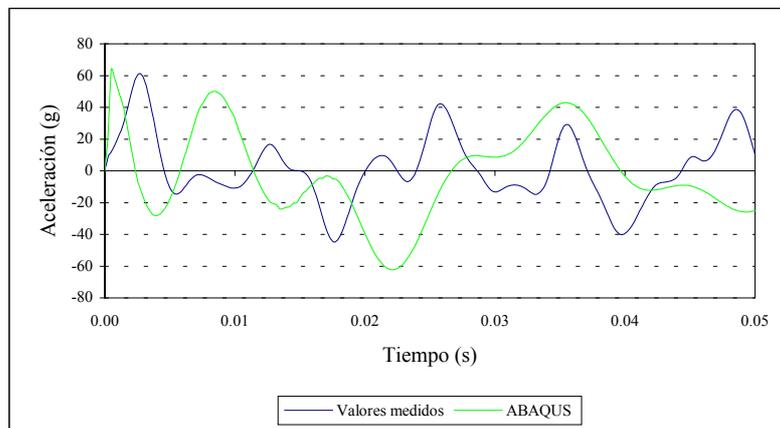


Figura 15. Aceleración de la Placa B para el Ensayo 1. Superposición Modal.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos, se observa lo siguiente:

Los resultados obtenidos con los programas COSMOS/M y ABAQUS son muy similares (Figuras 5 y 6), aunque el programa ABAQUS muestra una estructura levemente más rígida. Si bien el problema analizado es lineal, las cargas impulsivas presentan problemas especiales, por lo que esa coincidencia aporta una mayor confiabilidad a los resultados posteriores.

En la figura 9 se ve reflejada claramente la limitación del método de superposición modal para el caso de cargas impulsivas, donde se nota que la respuesta obtenida con 16 modos es fuertemente inexacta (diferencia con la aceleración pico del 200 %). Esto es debido a que la carga impulsiva excita los modos superiores de vibración. De esta forma se pierde una de las ventajas del método que es el hecho de que pocos modos inciden en la respuesta. Obviamente, debido a que las aceleraciones son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, este hecho aparece mucho más claro en esta variable.

En el caso de la Placa A, el ajuste entre las predicciones teóricas y experimentales es aceptable (Figuras 13 y 14), tanto en amplitudes como en frecuencias, produciéndose una sobrestimación del pico de aceleración. La

comparación entre la respuesta lineal (Figura 13) y no lineal geométrica (Figura 14) sugiere que la placa trabajó en forma prácticamente lineal.

En el caso de la Placa B, el ajuste numérico-experimental es muy bueno en cuanto al pico de aceleración, produciéndose un pequeño desajuste en las frecuencias.

AGRADECIMIENTOS

El grupo de trabajo agradece al Ing. Sergio Salomón haber cedido un terreno de su finca para llevar a cabo los trabajos experimentales y al personal técnico de apoyo, Sres. Eduardo Batalla y Daniel Torielli, por su gran predisposición durante el desarrollo y preparación de los ensayos. También agradece el apoyo económico brindado por el CONICET y la Universidad Nacional de Tucumán.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Biggs, Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, 1964.
- [2] R.W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, Mc Graw Hill, Inc, New York, 1975.
- [3] T. Krauthammer, N. Bazeos, T. J. Holmquist, Modified SDOF Analysis of RC Box - Type Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 112, No. 4, pp. 726-744, 1984.
- [4] Autoridad Regulatoria Nuclear, Efecto de Explosiones y Acciones Mitigantes Aplicables a Estructuras, Sistemas y Componentes de Instalaciones Civiles, 10 al 14 de agosto de 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [5] Sh U. Galiev, Experimental Observations and Discussion of Counterintuitive Behaviour of Plates and Shallow Shells Subjected to Blast Loading, Int. J. Impact Engng. Vol. 18, Nos. 7-8, pp. 783-802, 1996.
- [6] T. Krauthammer, C. K. Ku, A Hybrid Computational Approach for the Analysis of Blast Resistant Connections, Computer & Structures, Vol 61, No. 5, pp. 831-843, 1996.
- [7] L. A. Louca, Y. G. Pan, J. E. Harding, Response of Stiffened and Unstiffened Plates Subjected to Blast Loading, Engineering Structures, Vol. 20, No. 12, pp. 1079-1086, 1998.
- [8] B. R. Ellis, F. Tsui, Testing and Analysis of Reinforced Concrete Panels Subjected to Explosive and Static Loading, Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 1997, 122, Aug., 293-304.
- [9] C. Tuñón Suárez, Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil, Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1988.
- [10] S. A. Formby, R.K. Wharton, Blast Characteristics and TNT Equivalence Values Commercial Explosives Detonated at Ground Level, Journal of Hazardous Materials, pp. 183-198, 1996.
- [11] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.7-3.
- [12] COSMOS/M User Guide, Version 1.71.
- [13] PCM-DAS16/16TM Manual, ComputerBoards, INC.
- [14] HP Advanced Programming Techniques. HP VEE 5.0, Hewlett Packard.
- [15] J. Woodhouse, Linear Damping Models for Structural Vibration, Journal of Sound and Vibration, 215(3), pp. 547-569, 1998.