



## EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS ESTRATÉGICAS ANTE EXPLOSIONES

Jaime Retama Velasco<sup>1</sup> y A. Gustavo Ayala Milián<sup>2</sup>

### RESUMEN

En este artículo se presenta la formulación numérica del problema correspondiente a la respuesta de las estructuras ante acciones dinámicas repentinas con duraciones de décimas o milésimas de segundo. Se presenta un método de análisis no lineal, basado en el método de los elementos finitos y conceptos de la dinámica rápida o explícita, para evaluar y cuantificar el efecto de acciones dinámicas de corta duración, como explosiones, en las estructuras. El método proporciona resultados que permiten al analista conocer la vulnerabilidad de las estructuras ante este tipo de acciones.

### ABSTRACT

This paper presents a numerical formulation which corresponds to the problem associated with the dynamic response of structures subjected to loads of short duration, in the order of thousandths of a second. The considered nonlinear analysis method for the evaluation and quantification of dynamic effects of loads with short duration, as explosions, in structures, is based in the finite element method and concepts of explicit dynamics. The method provides results to the analyst engineer for the correct evaluation of the vulnerability of this kind of structures.

### ANTECEDENTES

Uno de los grandes problemas asociados con la seguridad de la infraestructura de un país es el conocer la vulnerabilidad de las diferentes estructuras estratégicas ante acciones de carácter extraordinario para las cuales no han sido diseñadas que de ocurrir conducen a escenarios de daño asociados a colapsos parciales y hasta totales que causan una disminución o pérdida total en su capacidad de ofrecer el servicio para el que fueron originalmente diseñadas.

Debido a los diferentes eventos destructivos sobre la infraestructura construida, asociados principalmente a actos maliciosos y en menor medida a accidentes, que ocurren en diferentes partes del mundo cada vez con mayor frecuencia, *e.g.*, World Trade Center en la ciudad de Nueva York en 2001, atentados En la estación de trenes de Atocha en Madrid en el 2004, ataques al subterráneo de Londres en 2005; entre muchos otros, han obligado a establecer programas nacionales de evaluación de estas y otras estructuras que son fundamentales para la seguridad nacional (McAllister *et al.* 2013), (Bangash y Bangash, 2006), (Stewart, 2006).

Particularmente en México, aunque en menor grado, se han presentado situaciones extraordinarias en las que diversas instalaciones del país han sufrido un colapso parcial o total. En el 2007 ocurrió un intento de atentado en la Torre Mayor, la explosión de varias bombas en Morelia en el 2008, explosión por acumulación de gas en las oficinas administrativas de PEMEX en el 2013, figura 1, y más recientemente, la explosión de una pipa de gas en la autopista México—Pachuca en el 2013. Recientemente la ocurrencia de accidentes en líneas vitales tales como ductos de hidrocarburos y sus equipos de operación ha aumentado: Guanajuato en 2007, Querétaro en 2007 y Veracruz en 2007.

Todos los accidentes anteriormente citados, derivados en su mayoría de actos maliciosos impredecibles, han producido no solo alarma y desconcierto en la población que ve este tipo de acciones como un atentado a la

<sup>1</sup> Investigador honorista, Mecánica Aplicada, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, México, D.F., CP. 04510, Tel: (55)5623-3600, ext. 8352; [jretamav@iingen.unam.mx](mailto:jretamav@iingen.unam.mx)

<sup>2</sup> Investigador, Mecánica Aplicada, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, México, D.F., CP. 04510, Tel: (55)5623-3658; [gayalam@iingen.unam.mx](mailto:gayalam@iingen.unam.mx)

seguridad nacional, sino también, un daño económico directo y colateral cuantioso; además de la pérdida de vidas humanas.

Desafortunadamente las mayoría de instalaciones estratégicas con que cuenta el país, tales como líneas vitales como es el caso de los ductos para la conducción de hidrocarburos, edificios gubernamentales, hospitales, edificios públicos importantes y estructuras civiles, que albergan grandes concentraciones de personas como es el caso de los estadios no han sido diseñadas ante de las muy diversas acciones extraordinarias que pueden afectan su capacidad de servicio, entre las que se encuentra las explosiones y el choque de cuerpos .

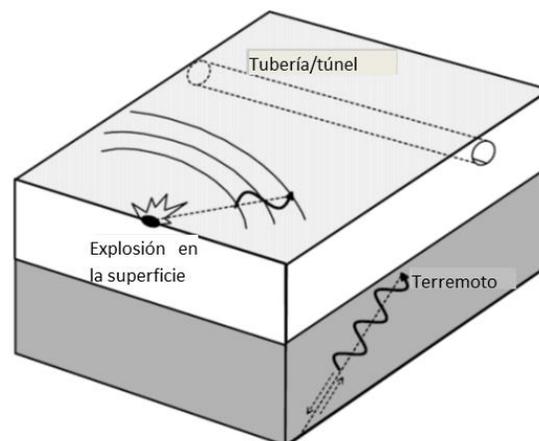


**Figura 1 Explosión en las oficinas de PEMEX en 2013**

### DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de que se cuenta con normas y estrategias para prevenir y mitigar accidentes en la infraestructura estratégica del país, todo está orientado a la vulnerabilidad asociada a causas naturales extraordinarias como son: sismos, fenómenos climáticos, fallas del suelo, entre otros. Sin embargo, para condiciones patógenas derivadas de actos perniciosos y/o accidentes, no existe una metodología que actualmente permita evaluar el comportamiento de las estructuras bajo estas condiciones (Ayala *et al.*, 2014). Dentro de las acciones perniciosas, premeditadas o no, a las cuales pueden estar expuestas las estructuras se tienen:

- Explosiones
- Incendios
- Impactos debidos al choque de cuerpos y
- Degradación debida a agentes químicos, entre otros



**Figura 2 Explosión cercana a un ducto**



En este trabajo se investigan los métodos de análisis estructural que permitan determinar la vulnerabilidad de las estructuras ante acciones perniciosas del tipo explosiones; ya sea que la explosión se deba a accidentes o a la detonación de un artefacto explosivo colocado dentro o fuera de las construcciones, figura 2.

En esta investigación se considerarán los diferentes niveles de explosiones a las que eventualmente las estructuras podrían ver sujetas durante su vida útil. Es importante mencionar que en este estudio no se investiga como minimizar los riesgos asociados a la ocurrencia de explosiones en una estructura, sino estudiar los métodos y herramientas de cálculo estructural que permitan simular el comportamiento de las estructuras ante los escenarios de demanda asociados a una explosión y bajo qué condiciones estos escenarios pueden disminuir su capacidad de servicio, o llevarlas a un colapso total.

En el caso de instalaciones y/o estructuras críticas, la reducción de los efectos ante estas acciones debe ser no solo consecuencia de planes de prevención, sino también, de manera importante, de medidas que permitan garantizar una suficiente resistencia e integridad estructural de las instalaciones y estructuras complementarias, de manera particular, la reducción de los efectos en ductos e instalaciones que permiten su operación ante explosiones, figura 2, es necesaria principalmente para: 1) la protección de estos sistemas críticos existentes y el diseño de sistemas nuevos, y 2) la protección de la integridad física de las personas. Para lograr lo anterior, se necesitan conocer las demandas que actuarán sobre las tuberías, accesorios e instalaciones al verse sometidas a explosiones, así como las consecuencias que estas demandas producen en ellas. Algunos de los factores clave que influyen en el desempeño de los ductos e instalaciones son: el tipo de peligro al que se encuentran expuestos, las propiedades de los materiales, su edad y estado estructural, la localización, el tamaño y las condiciones de operación. En la tabla 1 se muestran los posibles efectos a las estructuras y a sus ocupantes como consecuencia de una explosión (FEMA 427, 2003).

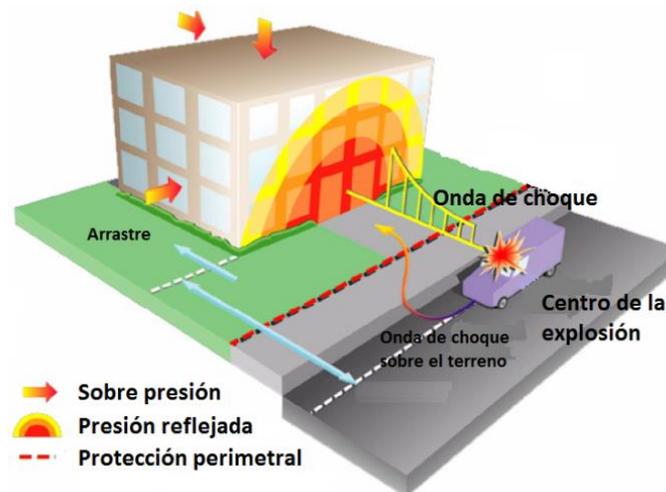
**Tabla 1 Posible efectos de la explosión a las estructuras y sus ocupantes**

<b>Distancia de la explosión</b>	<b>Probables efectos en los humanos</b>	<b>Daño a las estructuras</b>
<i>Cerca</i> Proximidad a la explosión	Mortal debido a: a) ráfagas de aire que hacen que los ocupantes estén sujetos a los efectos de altas presiones o lanzados hacia el interior de la construcción, b) impacto debido al colapso de algunos componentes, y c) escombros no estructurales que actúan como proyectiles.	a) Colapso de una parte de la estructura, b) Colapso progresivo de una parte de la estructura, o c) Colapso progresivo de la estructura completa.
<i>Moderada</i> Proximidad a la explosión	Lesiones serias como conmoción cerebral y fractura de cráneo debido a: a) ráfagas de aire que hacen que los ocupantes estén sujetos a los efectos de la presión o lanzados hacia el interior de la construcción, y b) escombros no estructurales que actúan como proyectiles.	Falla ( <i>i.e.</i> , colapso o degradación) de: a) miembros estructurales de la parte exterior como son vigas, columnas y losas, y b) elementos no estructurales, a lo largo de la fachada del edificio más cercano a la explosión.
<i>Lejos</i> Distancia a la explosión	Lesiones y laceraciones como consecuencia de: a) ráfagas de aire que lanzan a los ocupantes hacia el interior del edificio, y b) escombros no estructurales que actúan como proyectiles golpean a los ocupantes	Daño a elementos no estructurales, a lo largo de las fachadas de los edificios próximos a la explosión.

## MÉTODO DE ANÁLISIS ANTE EXPLOSIONES

Una explosión es una reacción química, extremadamente rápida, que libera energía y que ocurre en milésimas de segundo; ocasionando ondas transitorias de presión por efecto del desplazamiento de grandes volúmenes de aire, conocidas como ondas de choque (FEMA 427, 2003).

Desde el punto de vista del diseño estructural, los ataques más comunes a la infraestructura civil se realizan mediante la detonación de bombas y otros dispositivos explosivos. Las explosiones provocadas por este tipo de ataques son lo suficientemente grandes como para provocar grandes daños a las estructuras. Los diseños realizados con la finalidad de garantizar un cierto rango de seguridad para limitar o mitigar el daño causado por estos dispositivos, consideran que éstos se localizan en un punto crítico en la vulnerabilidad de las construcciones ante este tipo de acciones, ver figura 3. La localización de este punto crítico depende del lugar donde se encuentra construida la estructura y de las medidas de seguridad adoptadas para evitar este tipo de eventos.



**Figura 3 Explosión de un coche bomba cerca de un edificio**

## DINÁMICA EXPLÍCITA

Un área importante en la mecánica estructural, es la simulación computacional de la respuesta transitoria de las estructuras continuas o discretas ante acciones repentinas. Problemas en los que se analiza el comportamiento de las estructuras y el movimiento del suelo por efectos de acciones tales como eventos sísmicos, accidentes explosivos en instalaciones impactos producidos para el choque de automóviles y aeronaves, entre muchas otras, deben de ser analizados usándolos métodos de la denominada dinámica rápida o explícita (Belytschko y Hughes, 1986).

La aproximación más general para determinar la respuesta dinámica de las estructuras, es mediante métodos fundamentados en la integración numérica directa de las ecuaciones de equilibrio dinámico. Con estos métodos, se obtiene una solución aproximada al problema real que satisface las ecuaciones de movimiento en puntos discretos en el tiempo. En ellos, dependiendo de las parámetros requeridos por los algoritmos empleados para la integración numérica en el tiempo de las ecuaciones de equilibrio dinámico, se pueden tener dos grandes grupos; métodos implícitos y explícitos, (Wilson, 2000).

Los métodos explícitos utilizan, básicamente, la solución de las ecuaciones diferenciales en el tiempo " $t$ ", previamente calculada, para obtener una solución en el tiempo " $t + \Delta t$ ". Para poder realizar este análisis, es necesario utilizar incrementos de tiempo sumamente pequeños que garanticen que el método sea estable y converja a la solución. Por lo tanto, todos los métodos explícitos son condicionalmente estables con respecto al tamaño del incremento de tiempo. La ec 1 corresponde a una solución explícita en la que la variable desconocida solo aparece en el lado izquierdo de la misma



$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t f(x(t)) \quad (1)$$

donde  $f$  es una función solo de las variables en el tiempo  $t$ .

A continuación se enumeran algunas de las principales características de los métodos explícitos de integración en el tiempo:

1. Requieren poco tiempo de cálculo para cada paso de tiempo,
2. Los algoritmos de solución son simples y confiables tanto en su lógica como en su estructura, por lo que permiten un tratamiento simple de las distintas no linealidades,
3. Requieren menos esfuerzo computacional y tiempo de almacenamiento de información,
4. No necesitan de operadores tangentes, costosos de obtener, y que son propios de los métodos implícitos,
5. El paso de integración en el tiempo está acotado y normalmente resulta muy pequeño, haciendo difícil y costosa la solución de problemas que se desarrollan en tiempos muy grandes.

En los métodos implícitos, para aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales para un tiempo " $t + \Delta t$ " a partir de la solución en el tiempo " $t$ ". Sin embargo, debido a sus hipótesis, este tipo de métodos requieren la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales en cada paso de tiempo. Con ellos es posible utilizar incrementos de tiempo más grandes, en comparación con los utilizados en los métodos explícitos. Los métodos implícitos pueden ser condicionalmente o incondicionalmente estables. La ec 2 muestra que para obtener la solución para un tiempo dado partir de la solución en un tiempo pasado. La variable desconocida aparece en ambos lados de la ecuación,

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t f(x(t + \Delta t)) \quad (2)$$

donde  $f$  es una función de las variables en los tiempos  $t$  y  $t + \Delta t$ .

De forma similar que para el caso de los métodos explícitos, los métodos implícitos presentan algunas ventajas y desventajas, como son:

1. Son métodos en general estables y robustos,
2. Los incrementos de tiempo pueden, garantizando la estabilidad en las solución, ser más grandes que en los métodos explícitos,
3. Permiten soluciones con buena aproximación. Las tolerancias de error son bajas,
4. La linealización de la solución mediante el método de Newton-Raphson exige el uso de operadores tangentes que en la mayoría de los casos son de difícil obtención,
5. Tienen altas demandas de almacenamiento al utilizar métodos directos de solución de sistemas de ecuaciones.

Gráficamente se puede mostrar la diferencia entre los problemas típicos de la mecánica estructural que se resuelven mediante métodos explícitos o implícitos, figura 4. Su análisis y solución en el tiempo, se realiza dependiendo de la duración de la excitación dinámica a la que se encuentran sujetos. Como se puede observar, la duración de una explosión es de apenas unas milésimas de segundo; motivo por el que este tipo de problemas se debe analizar mediante la dinámica explícita.

En este artículo se estudia la respuesta dinámica de las estructuras ante cargas producidas por una explosión, por lo que se utiliza la dinámica rápida o explícita para este fin. Considere el equilibrio dinámico dado como (Sluys, 1999),

$$M\ddot{a}^t = f_e^t - f_i^t \quad (3)$$

donde

$M\ddot{a}^t$  es el vector de fuerzas de inercia

$f_e^t$  es el vector de fuerzas externas

$f_i^t$  corresponde al vector de fuerzas internas

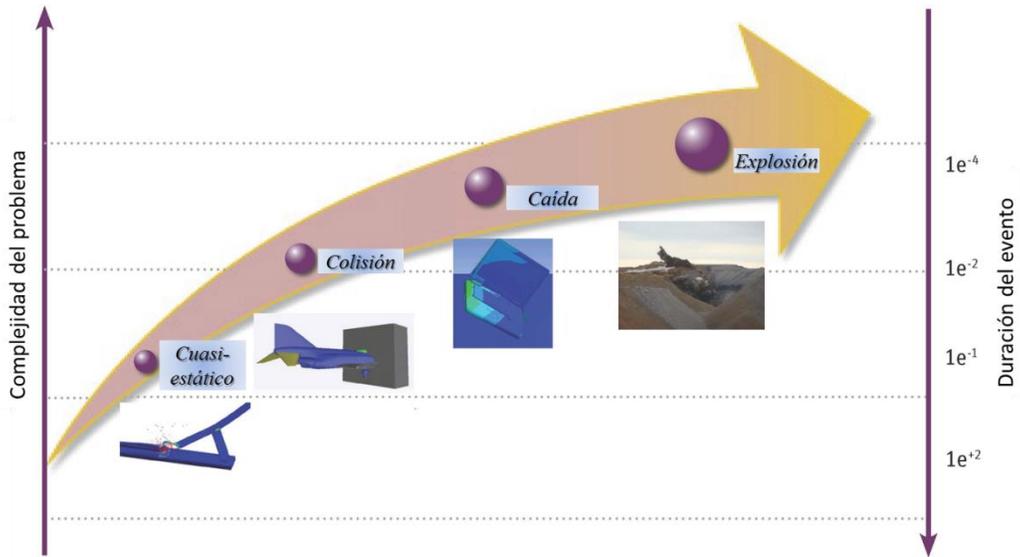


Figura 4 Problemas dinámicos en la mecánica estructural

Las fuerzas internas se obtienen mediante

$$f_i^t = \int_{\Omega} B^T \sigma^t d\Omega \tag{4}$$

con

$\sigma(x)$  es el estado de esfuerzos en el punto  $x$ , y

$B(x)$  es la matriz de transformación deformación-desplazamiento definida a partir de las función de forma, a nivel elemental.

En los métodos de solución explícitos, se utiliza una matriz diagonal de masas  $M$  para hacer eficiente al método. Por lo tanto las aceleraciones nodales se pueden calcular fácilmente como

$$\ddot{a}^t = [M]^{-1}(f_e - f_i)^t \tag{5}$$

Y mediante un algoritmo de integración en el tiempo, como el del método de Newmark (Wilson, 2000) se calculan las velocidades y los desplazamientos nodales mediante las siguientes ecuaciones,

$$\dot{u}^{n+1} = \dot{u}^n + \Delta t[(1 - \gamma)\ddot{u}^n + \gamma\ddot{u}^{n+1}] \tag{6}$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t\dot{u}^n + \frac{\Delta t^2}{2}[(1 - 2\beta)\ddot{u}^n + 2\beta\ddot{u}^{n+1}] \tag{7}$$

donde

$n$  se refiere al tiempo  $t^n$

$n + 1$  equivale al tiempo  $t^{n+1} = t^n + \Delta t$

$\Delta t$  es un incremento en el tiempo

La solución de las ecs 6 y 7, se hace seleccionando valores para los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$ . El primer parámetro introduce un amortiguamiento numérico artificial. Dependiendo de los valores adoptados para el segundo parámetro, hacen que se tenga una implícita o explícita. En la tabla 2 se muestran valores típicos.



Tabla 2 Integración implícita-explicita

$\beta$	Método	Tipo de solución
0	Dif. Adelante	Explicito ● ↓ Implicito
1/2	Regla medio punto	
2/3	Galerkin	
1	Dif. Atrás	

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con fines ilustrativos en este artículo se presenta un modelo simplificado de una explosión causada por una bomba en un entorno urbano (Casadei, 2005). La explosión se produce cerca de dos edificios. El modelo empleado abarca un volumen de 100x100 metros en planta y 70 metros en elevación. En la discretización empleada se incluyen los edificios y el volumen de aire que los rodea, ver figura 5.

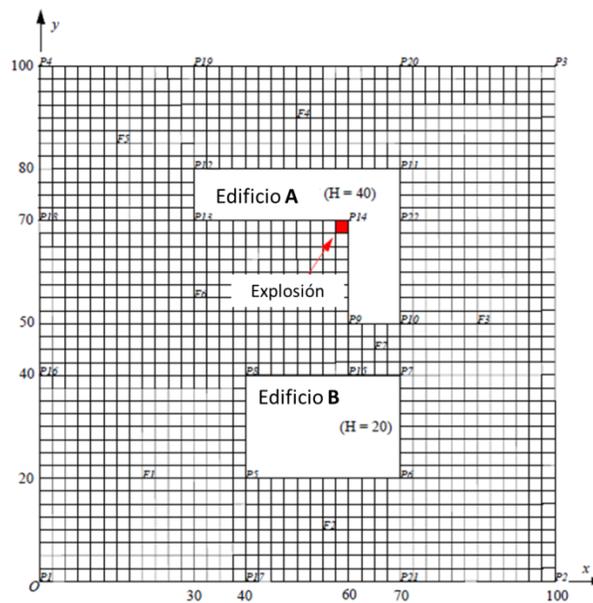


Figura 5 Explosión cerca de un área urbana

Para fines simplificados de este análisis, se considera que los edificios se comportan como cuerpos rígidos. Las fronteras son absorbentes (no existen condiciones que permitan el reflejo de las ondas). Adicionalmente, se considera una interacción rígida entre el fluido y la estructura. Se considera que la explosión se da en una esquina del edificio A. En la figura 6 se muestra la geometría del modelo adoptado, en planta y elevación.

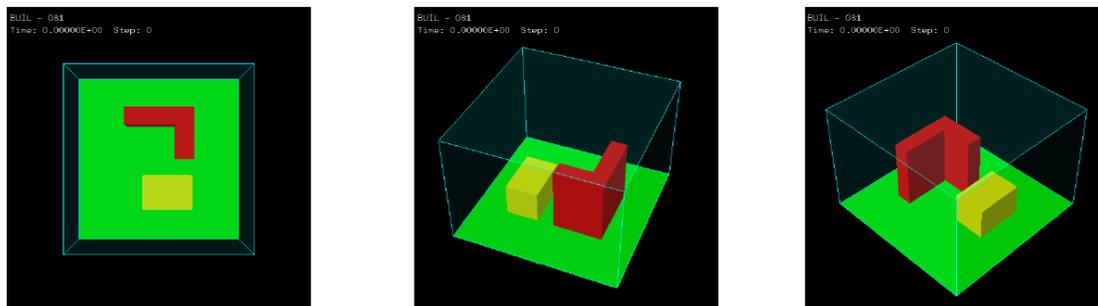
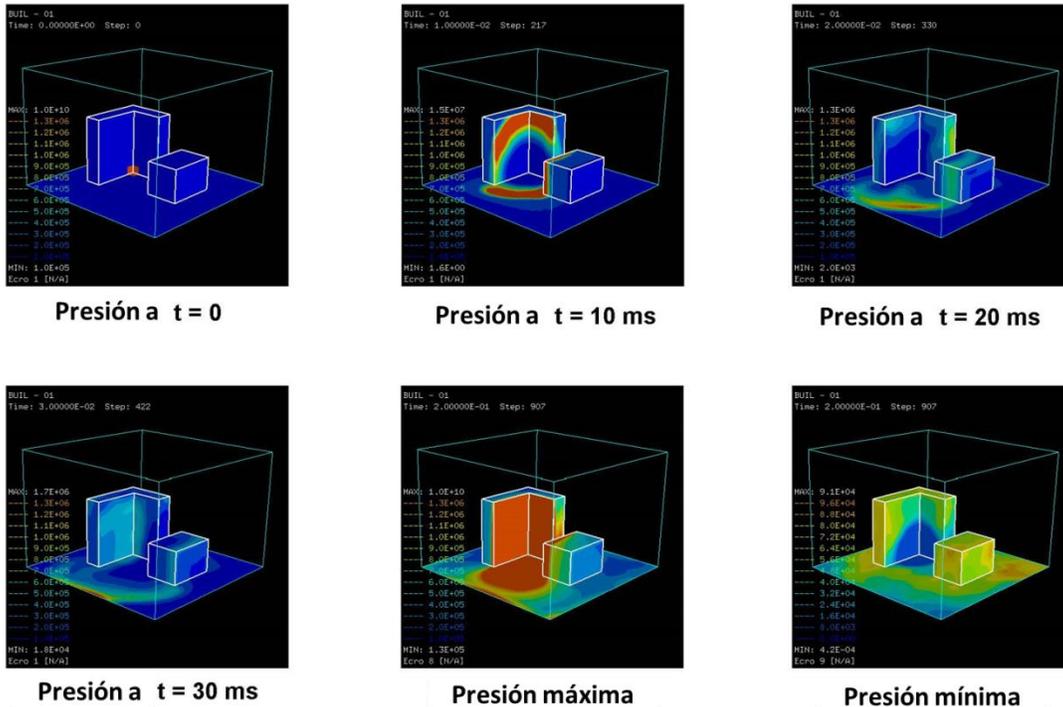


Figura 6 Vistas en elevación y planta del modelo de los edificios

El modelo numérico empleado se construyó y ejecutó en el programa de computadora EUROPLEXUS, desarrollado en el Laboratorio Europeo para la Evaluación Estructural de la Comisión Europea.



**Figura 7** Distribución de presiones en diferentes tiempos

En la figura 7 se muestran diferentes distribuciones de presión a lo largo del tiempo. Las primeras cuatro corresponden a la presión que ejerce el aire sobre los edificios y el suelo. Las dos restantes muestran las presiones máximas y mínimas bajo las mismas condiciones.

## CONCLUSIONES

En este artículo de investigación se presentan los métodos numéricos utilizados para analizar la respuesta dinámica de una estructura ante los efectos de una carga transitoria dinámica del tipo explosión, y que actúa en centésimas o milésimas de segundo. Se hace especial énfasis en la denominada dinámica rápida o explícita y sus algoritmos de solución aproximada en el tiempo de las ecuaciones diferenciales de equilibrio dinámico que gobiernan el problema.

Es importante mencionar que este tipo de métodos explícitos permite obtener la solución dinámica de una estructura ante solicitaciones extraordinarias de muy poca duración, por lo que son condicionalmente estables y su aplicación solo es posible cuando se utilizan pasos de tiempo muy pequeños para garantizar su estabilidad y convergencia.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante el proyecto interno 3548 con título "Evaluación de la vulnerabilidad de estructuras estratégicas ante acciones extraordinarias como fuego y explosión". De igual forma el primer autor agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico recibido para realizar una estancia posdoctoral dentro de la Coordinación de Mecánica Aplicada.



## REFERENCIAS

- Ngo T., Mendis P., Gupta A., y Ramsay J. (2007), “**Blast loading and blast effects on structures-An overview**”, Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue: Loading on Structures, pp. 76-91.
- Bangash M.Y.H., y Bangash T. (2006), “**Explosion-resistant buildings**”, Springer, Londres, Reino Unido.
- Stewart M.G., Netherton M.D., y Rosowsky D.V. (2006), “**Terrorism risks and blast damage to infrastructures**”, Natural Hazards Review (ASCE), vol. 7, núm. 3, pp. 114-122.
- Belytschko T., y Hughes T.J.R. (Editores). (1983), “**Computational methods for transient analysis**”, North-Holland, Amsterdam.
- McAllister T.P., Gross J.L., Sadek F., Kirkpatrick S., MacNeill R.A., Zarghamee M., Erbay O.O., y Sarawit A.T. (2013), “**Structural response of world trade center building 1, 2 and 7 to impact and fire damage**”, Fire Technology, vol. 49, pp. 709-739.
- Ayala G., Retama J., y Juárez G. (2014), “**Evaluación de la vulnerabilidad de estructuras estratégicas ante acciones extraordinarias como fuego y explosión**”, Reporte de investigación (en proceso de desarrollo), Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003), “*Risk Management Series: Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks*”, FEMA 427, <https://www.wbdg.org/ccb/DHS/fema427.pdf>.
- Wilson E.L. (2000), “**Three dimensional static and dynamic analysis of structures**”, Computer & Structures (CSI), Berkeley, California, USA.
- Sluys L.J. (1999), “**Computational methods in non-linear solid mechanics**”, Notas de clase del curso CIE5142, Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Técnica de Delft, Holanda.
- Casadei F. (Julio 2005), “**Use of EUROPLEXUS for building vulnerability studies. Progress report 1**”, European Commission, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Center, Ispra, Italia.