



# Efecto de explosiones en estructuras de contención

## Resumen

Los materiales explosivos incluyen tanto a los materiales propiamente explosivos como a aquellos que, si bien no serán utilizados por sus propiedades explosivas, pueden sin embargo explotar. Cuando se produce una explosión, se generan gases a muy alta presión y temperatura. Estos gases, al expandirse violentamente, inducen en el entorno una onda de choque que se desplaza a una velocidad muy grande (superior a la de los gases en expansión) y cuyo pico de presión es muy elevado.

Tanto la onda de choque como los gases en expansión provocan en el medio circundante efectos mecánicos destructores. Si además, tales gases producidos por la detonación son tóxicos o contienen materiales radiactivos o contaminantes, tienen una acción directa sobre el medio ambiente, deteriorándolo.

Cuando existe riesgo de explosión accidental de un material explosivo que puede generar productos nocivos en dicho proceso, es necesario construir una estructura que no sólo pueda re-

sistir los efectos de la explosión accidental sino, que también, debe confinar tales productos de explosión [1]. En este trabajo se propone un análisis preliminar, basado en métodos numéricos, de los efectos de una explosión sobre una estructura de contención del tipo citado. La metodología consiste en la reducción del sistema a un modelo dinámico en un grado de libertad (SDOF), el cual será resuelto con un esquema apropiado para la solución de sistemas rígidos (*stiff systems*). El objeto de este análisis es sentar las bases de diseño de estructuras de contención que aislen al medio ambiente de los efectos de una eventual explosión de los materiales almacenados en las mismas. El diseño de este tipo de estructuras deberá estar en acuerdo con la normativa dada por el manual Unified Facilities Criteria (UFC), del Departamento de Defensa de los Estados Unidos [2].

*Palabras Claves:* Explosiones, Dinámica de Estructuras, Dinámica de Fluidos, Interacción Fluido-Estructura, Hormigón Armado.

## 1. Introducción

Durante los primeros 60 años del siglo xx el criterio de diseño de estructuras de protección estuvo regido por el análisis experimentación y de los resultados de los eventos catastróficos producidos. Con el advenimiento de avances en la tecnología de computadoras se comienzan a aplicar técnicas de modelización numérica, tanto para la evaluación de las explosiones como de la resistencia a las mismas de las estructuras de protección. Esto se vio reflejado en los criterios de diseño que comenzaron a ser volcados en manuales [2]. La información en estos manuales cubre solo las situaciones de diseño más probables y está basada en fenómenos bien estudiados y conocidos. En consecuencia, hay numerosas situaciones en las que su aplicación es limitada y es necesaria la conducción de investigación si se desea optimizar el diseño. Tal es el caso de las estructuras de contención para las que, si bien hay criterios de diseño relativamente adecuados para el caso en que existen aberturas por las cuales pueden salir

los gases producidos por la explosión, a medida que estas reducen su tamaño se complica la interacción entre los efectos de la explosión y la estructura y los métodos establecidos en los manuales pierden validez. Para este caso será necesario aplicar complejos métodos de modelización numérica, pero siempre se deberá realizar previamente un análisis por métodos simplificados que permita obtener un diseño preliminar que se pueda usar como punto de partida para una optimización. En este trabajo se realizará un análisis preliminar que consiste en

la reducción del sistema a un modelo dinámico en un grado de libertad [2] (SDOF), el cual será resuelto con un esquema apropiado para la solución de sistemas rígidos (*stiff systems*). El objeto de este análisis es sentar las bases de diseño de estructuras de contención que aislen al medio ambiente de los efectos de una eventual explosión de los materiales almacenados en las mismas, de manera que el diseño sea compatible con los criterios dados por el manual Unified Facilities Criteria (UFC), del Departamento de Defensa de los Estados Unidos [2].

dante. En general, la onda de choque tiene una forma similar a la dada en la Figura 1, con una fase positiva, de presiones superiores a la atmosférica y una fase negativa, con presiones inferiores a la atmosférica. La duración de la onda de sobrepresión es mucho menor a la de la fase negativa del pulso y su intensidad es muy superior a la de ésta última. En general, los efectos de la fase negativa son despreciables sobre la respuesta de la estructura analizada, aunque para estructuras compuestas de materiales livianos puede llegar a ser de interés su consideración [4-7]. En consecuencia, para el diseño de estructuras se suele aproximar a la onda de choque por un pulso triangular de valor pico y duración iguales a aquellos de la fase positiva (Figura 3). De la misma forma la presión de los gases producto de la explosión puede ser aproximada por un pulso triangular. En general el valor pico de este pulso será mucho menor a aquel de la onda de choque, mientras que su duración será mucho mayor, motivo por el cual se la conoce como carga cuasiestática.

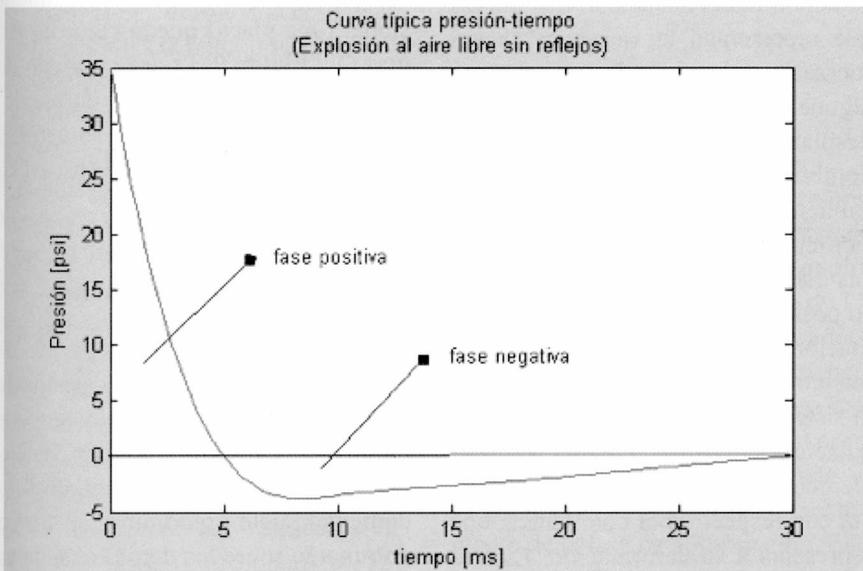


Figura 1. Típica curva presión-tiempo para una onda de choque.

### 1.1. Carga sobre una estructura debida a explosión

En una explosión se produce una reacción química que convierte al material explosivo en productos oxidados y calor. En un material de alto poder energético se produce una detonación que es un proceso de quemado a velocidades que exceden a la velocidad del sonido en la substancia en cuestión. En este proceso el material explosivo se convierte de estado sólido

o líquido en gas. En esta transformación se producen grandes aumentos de temperatura y presión en el gas que al llegar a la interfase con el medio circundante provocan una onda de choque que se propaga por el medio. Entonces se producen dos efectos, uno debido a la expansión de los gases producidos en el proceso de detonación y el otro debido a la onda de choque que se produce en la interfase entre el explosivo y el medio circun-

#### 1.1.1. Explosiones confinadas

En este caso la onda de choque incidente será reforzada por el reflejo de la misma en las paredes interiores, piso y techo de la estructura de contención, lo que producirá una amplificación de sus efectos. Además, dependiendo del grado de confinamiento, es decir del área de ventilación, se producirá un incremento de la presión interna debida a la presión y temperatura de los gases producto de la explosión. Ésta puede extenderse por tiempos prolongados con respecto a la duración de la onda de choque y en relación al período fundamental de la estructura, por lo cual puede llegar a tomar características dominantes en

el diseño y rara vez es despreciable, a menos que la superficie de ventilación sea suficientemente elevada y presente una distribución correcta. En este caso los procedimientos establecidos en los manuales de diseño no son adecuados y debe recurrirse al uso de modelos numéricos avanzados en una etapa de verificación.

## 1.2. Respuesta de una estructura a cargas dinámicas

Tal como ocurre en el caso de estructuras sujetas a cargas estáticas o cuasiestáticas (con un tiempo de aplicación que supera ampliamente el período fundamental de la estructura analizada), el cálculo de la respuesta está basado en la conservación de momento (equilibrio en este caso) y energía. Sin embargo, en el caso de cargas dinámicas el rápido cambio de las fuerzas externas e internas (con respecto al período natural de la estructura –en general, las cargas se consideran dinámicas cuando su tiempo de aplicación es menor a cinco veces el período fundamental de la estructura– [1]), así como también de las aceleraciones y velocidades hacen que las fuerzas de inercia y la energía cinética adquieran relevancia. Es así como en el caso de un análisis dinámico, las fuerzas de inercia deben ser consideradas en la ecuación de conservación de momento, que así tomará la forma:

$$F - R = Ma \quad (1)$$

en donde  $F$  representa a las fuerzas externas,  $R$  la resistencia interna del material a la deformación,  $M$  la masa y  $a$  la aceleración. Y para el caso de la conservación de la energía se tiene:

$$WD = KE + SE \quad (2)$$

en la que  $WD$  representa el trabajo realizado por las fuerzas exteriores,  $KE$  la energía cinética y  $SE$  la energía de deformación, que incluye tanto a la energía potencial de la deformación elástica, cuanto a la energía disipada en la deformación plástica.

## 1.3. Curvas resistencia-desplazamiento

Bajo la acción de fuerzas externas los cuerpos se deforman. Las fuerzas internas que tienden a restituir el cuerpo a su condición anterior a la carga se denominan resistencia. Las curvas que representan la variación de esa fuerza en relación a la variación de alguna coordenada característica del desplazamiento del sistema reciben el nombre de curvas resistencia desplazamiento. A medida que el elemento estructural es cargado aparecen fuerzas internas que tienden a restituirlo a su posición inicial debidas a la deformación elástica del componente, asimismo parte de la energía entregada al sistema se disipa al generarse articulaciones plásticas. De esta forma el elemento va aumentando su resistencia con respecto a la coordenada que representa a su deformación. Esto lo realiza a distintas tasas de aumento que definen a la rigidez unitaria (por unidad de dimensión –longitud, área, volumen, de acuerdo al caso–) del sistema,  $K$  correspondiente a una deformación dada por la coordenada de desplazamiento  $X$ . Así, la rigidez unitaria irá disminuyendo a medida que gradualmente se va perdiendo la integridad estructural del elemento (se forman articulaciones plásticas). Durante este período se dice que el cuerpo pasa por los estados elástico y elastoplástico. Este proceso continúa hasta que el elemento llega a una condición en la que el deterioro de su integridad estructural le hace imposible el

mantener el aumento de resistencia en relación a los aumentos en la coordenada de desplazamiento. En este punto se dice que el elemento ha llegado a su período plástico. La resistencia unitaria a la deformación provista por el elemento en este punto se denomina resistencia unitaria última,  $r_u$  y el desplazamiento correspondiente será  $X_p$ . Para la determinación de la curva carga-desplazamiento de un elemento estructural se utilizan las ecuaciones de conservación del momento y la energía aplicadas al caso estático [2]. Una curva resistencia-desplazamiento típica para un elemento bidimensional (una placa) puede verse en Figura 2 y Figura 9. En este período de la historia de deformación de un elemento aún se mantiene su integridad estructural en forma global (no así en forma localizada).

## 1.4. Sistemas dinámicamente equivalentes

A pesar de tener numerosos grados de libertad y, por consiguiente muchos modos naturales de vibración, en los elementos estructurales el modo fundamental suele predominar en forma dominante sobre los demás cuando se considera su respuesta a cargas corta duración. Es por esto que el comportamiento dinámico de dicho sistema se puede aproximar por el de un sistema equivalente en el cual la única coordenada que define su posición estará dada por la coordenada de posición de un punto representativo del primer modo de vibración del sistema. Es así como el sistema se puede reducir a uno del tipo masa, resorte, amortiguador, con un único grado de libertad (SDOF) en el que las características de resistencia e inercia del sistema original son asimiladas y aproximadas por aquellas asociadas al primer modo de vibración del sistema [2].

#### 1.4.1. Factores dinámicos de diseño

Para reducir un elemento estructural a un sistema SDOF equivalente se necesita definir los parámetros dinámicos, de carga y de resistencia de éste último, vale decir  $M_e = K_M M$ : Masa equivalente,  $R_e = K_L R$ : Resistencia equivalente y  $F_e = K_L F$ : Fuerza equivalente.  $K_L$  y  $K_M$  son los factores de carga y masa respectivamente. Estos parámetros, cuando son aplicados al sistema equivalente hacen que éste se comporte dinámicamente en forma aproximada a aquella del sistema original. Para hallar el valor de estos parámetros se propone una forma deformada coincidente con la forma del modo fundamental del sistema, de acuerdo a lo explicado en el apartado 1.4. Una vez hecho esto se aplican consideraciones energéticas asociadas al trabajo de las fuerzas exteriores, energía cinética y trabajo de deformación del sistema. En los problemas cuasiestáticos asociados a una fase de presión de gases dominante sobre la de la onda de choque sería más apropiado proponer una forma deformada coincidente a aquella de la deformación estática del sistema, pero se ha mostrado que esto no afecta en forma apreciable los resultados del análisis dinámico correspondiente [2].

#### 1.4.2. Factor de carga-masa

La ecuación de conservación del momento (Ecuación (1)) puede ser escrita para el sistema equivalente como

$$K_L F - K_L R = K_M M a \quad (3)$$

La que se puede reescribir como

$$F - R = K_{LM} M a = M_e a \quad (4)$$

en la que  $K_{LM} = K_M / K_L$  es el factor de carga-masa. Éste se encuentra tabulado en los manuales de diseño como el UFC [2] para los diversos períodos de

deformación (elástico, elasto-plástico y plástico) de acuerdo al tipo de estructura.

#### 1.5. Diseño con hormigón armado, modos de comportamiento estructural

La respuesta del hormigón armado a la carga externa puede realizarse en dos modos, dúctil y frágil. En el modo dúctil el elemento estructural desarrolla largas deformaciones plásticas sin colapsar, mientras que en modo frágil se produce una pérdida de la integridad estructural que puede ser global o localizada.

#### 1.6. Resistencia dinámica de los materiales

Tanto el hormigón como el acero presentan un aumento de su resistencia cuando son sometidos a cargas explosivas. Esto se deba al aumento de las tasas de deformación lo que produce en el hormigón una mayor resistencia a la compresión y en el acero una mayor tensión de fluencia. Sin embargo, la resistencia última del acero no se ve grandemente modificada por el aumento de la tasa de deformación. Este aumento de resistencia es sustancial y, por lo tanto, es tenido en cuenta en el cálculo de la resistencia última del hormigón armado [2].

### 2. Configuración y resultados de las simulaciones

El proceso de diseño de una estructura sometida a la acción de una carga explosiva comienza con la evaluación de la estructura desde el punto de vista de su resistencia a las cargas estáticas. A partir de allí y en base a consideraciones relacionadas con la experiencia del diseñador en

un ambiente de cargas dinámicas se propone una configuración preliminar geométrica y de materiales de construcción. Desde allí se propone un modelo dinámico simplificado que deberá dar una estructura que sirva como punto de partida a la verificación de la solución propuesta con medios numéricos complejos y su eventual validación por datos experimentales.

Aquí se propone analizar el comportamiento de una estructura completamente estanca de forma de cubículo cerrado de 30' x 30' x 12', en cuyo interior se coloca una carga de 5 lb de TNT situada a 15' de la pared trasera, 7.5' de una de las paredes laterales y 3' del piso. El método simplificado de resolución consiste en la reducción del sistema a tres SDOF's independientes, uno para la pared trasera, otro para la pared lateral más cercana y uno último para el techo, los que se consideran empotrados en los bordes. Se ha demostrado que este tipo de simplificación da resultados suficientemente adecuados para un diseño preliminar de la estructura sujeta a las cargas explosivas [1]. El SDOF tendrá la forma dada por la Ecuación (4), la cual se puede reducir a una formulación del tipo *espacio de estados* dada por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = [u(t) - r(x_1)] (1/(K_{LM}(x_1)M)) \end{cases} \quad (5)$$

en la que el estado  $x_1$  representa al desplazamiento y  $x_2$  la velocidad del SDOF y  $u(t)$  es la presión ejercida por la explosión. El sistema de ODE's resultante es de la forma  $\dot{x}' = f(x, t)$ , que en este caso es un sistema ODE no lineal y *stiff*, el cual fue resuelto mediante un esquema del tipo Runge-Kutta apto para la resolución de dichos problemas [3]. La resolución se realizó en variable y tiempo continuos utilizando Simulink®.

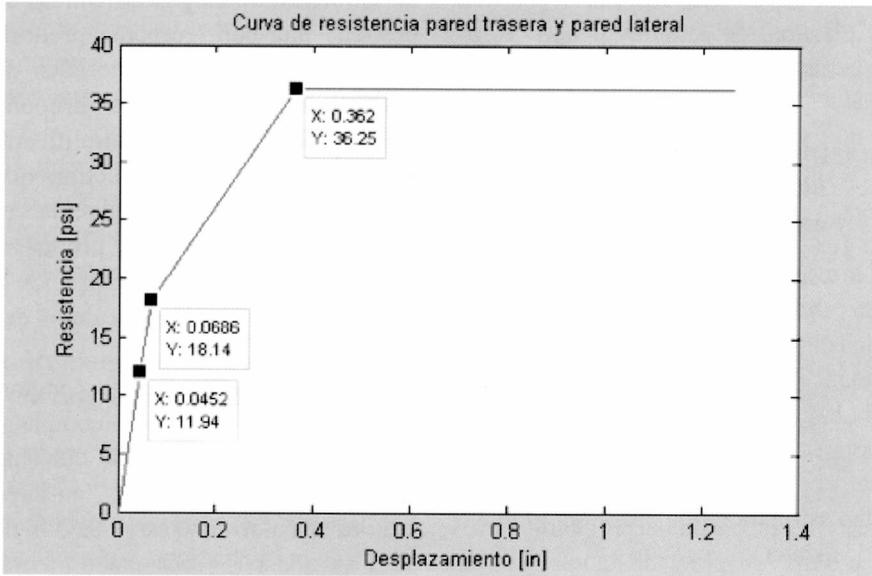


Figura 2 Curva resistencia-desplazamiento para las paredes trasera y lateral.

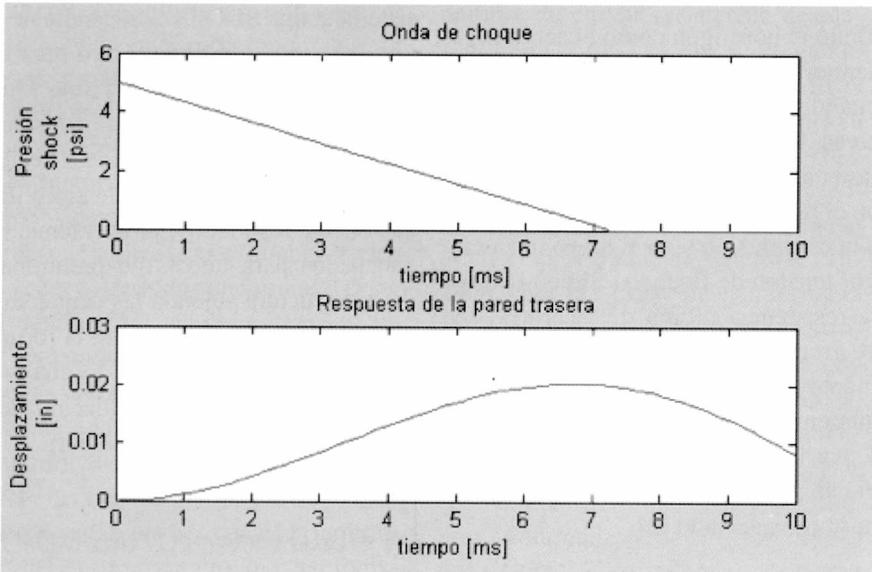


Figura 3. Onda de choque y respuesta de la pared trasera.

Tabla 1. Resistencias de diseño de los materiales

	Hormigón $f'_{dc}$	Acero $f_{ds} = f_{dy}$
Flexión	—	81180 psi
Compresión	4920 psi	—
Tensión diagonal	4000 psi	72600 psi
Corte directo	—	72600 psi

### 2.1. Pared trasera

De acuerdo con UFC, se obtienen los siguientes valores para la onda de choque en función del tipo de explosivo, características geométricas de la estructura y ubicación de la carga, APRP (*Average Peak Reflected Pressure*) = 5 psi., APSI (*Average Peak Scaled Impulse*) = 10 psi-ms/lb<sup>1/3</sup>. Duración del pulso  $t_0 = 7.27$  ms (Figura 3). Con respecto al gas generado por la detonación del explosivo, en función de la cantidad de explosivo y el volumen del recinto (asumiendo un comportamiento perfectamente estanco de la instalación), Presión pico,  $P_g = 11$  psi, duración,  $t_g = 6545$  s. (Figura 4). Se intenta el diseño con Hormigón de resistencia última a la compresión  $f_c = 4000$  psi, acero para el armado de tensión de fluencia  $f_y = 66000$  psi. Las resistencias de diseño de los materiales (debido al incremento por velocidad de deformación) vienen dadas en la Tabla 1.

Se toman paredes de 12" de espesor, con un recubrimiento de 0.75" en el lado interior, y 1.5" del lado exterior. Para la armadura de enlazamiento se toman barras de acero #6. Se intenta en esta etapa una armadura vertical con barras #4 con separación 5" oc y una armadura horizontal con barras #4 con separación 10" oc. Si se propone un  $x = 0.5$ , para obtener líneas de rotura a 45° y realizando un análisis elasto-plástico del comportamiento de las placas de acuerdo con UFC [2] se obtiene la curva resistencia-desplazamiento dada en la Figura 2. En la Figura 2 se indican los puntos de paso del estado elástico al plástico, pasando por los dos puntos intermedios de creación de articulaciones plásticas (dentro del estado elasto-plástico).

En cuanto a los valores de la masa efectiva del sistema, se obtuvieron los

valores para el factor de carga-masa dados en la Tabla 2. Con estos valores del coeficiente  $K_{LM}$  en función de  $x_I$ , la curva resistencia-desplazamiento de la Figura 2 y la historia temporal de la onda de choque se realizó una simulación numérica a partir de la Ecuación (5). De este modo se pueden observar los efectos sobre el sistema de la onda de choque sin tomar en consideración los efectos de los gases de explosión totalmente confinados dentro de la instalación (Figura 3). Se puede ver que los efectos de la onda

de choque sobre la respuesta de la estructura son muy pequeños (el punto de mayor desplazamiento de su modo fundamental de vibración se mueve  $x_I^{(max)} = 0.0203$  in, lo que se produce a un tiempo  $t_m = 6.67$  ms. Observando la curva resistencia-desplazamiento se puede observar que estos valores están dentro del régimen elástico de la estructura, con lo que se asegura su plena integridad estructural y, por lo tanto, su estanqueidad, que es uno de los objetivos fundamentales de esta instalación.

por la onda de presión de los gases de detonación del explosivo, lo que se debe al confinamiento total que se produce en la instalación. En este caso, el desplazamiento máximo  $x_I^{(max)} = 0.3056$  in, a un tiempo  $t_m = 21.7$  ms. Si observamos la curva resistencia-desplazamiento observamos que la respuesta está en la región elasto-plástica del comportamiento de la estructura, lo que garantiza la integridad estructural de la misma, así como también su estanqueidad, con lo que la estructura cumple con su cometido y las suposiciones de diseño son, de esta forma validadas. La Figura 5 muestra las grandes diferencias entre los desplazamientos en el elemento inducidos por la onda de choque y los gases producidos por la detonación del explosivo.

Tabla 2. Valores del factor de carga-masa para las paredes trasera y lateral

	Elástico	Elasto-Plástico (dos simples)	Elasto-Plástico (cuatro simples)	Plástico
$K_{LM}$	0.77	0.78	0.79	0.64

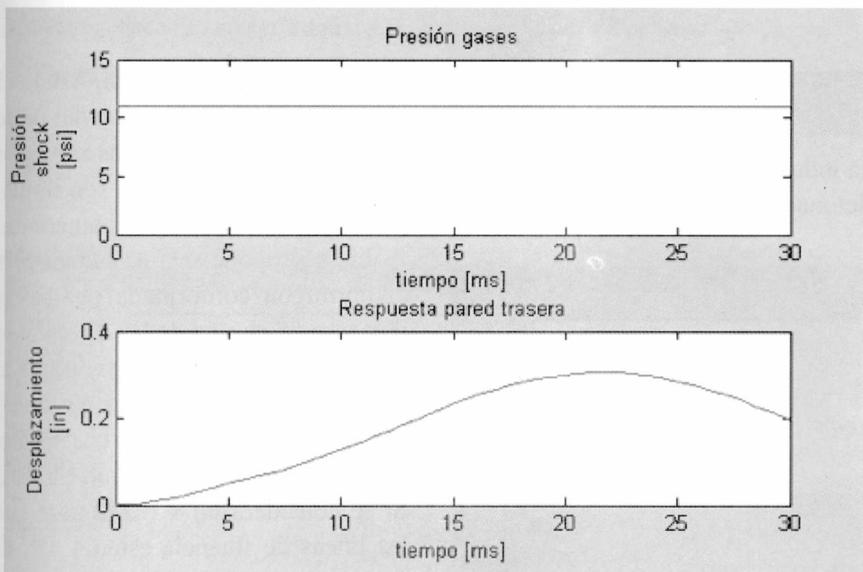


Figura 4. Onda de choque de los gases de detonación y respuesta de la pared trasera.

En una segunda simulación numérica se evaluó la respuesta del sistema a la fase de gases confinados en combinación con la onda de choque obteniéndose los resultados dados en la Figura 4. Se puede observar en

este caso que la respuesta del elemento estructural será apreciable. En efecto, es evidente que los efectos en la respuesta de la estructura a la onda de choque son despreciables frente a aquellos provocados

## 2.2. Pared lateral más cercana al explosivo

Los datos relevantes para la realización de esta simulación son similares a los utilizados para la pared trasera debido a que la planta de la instalación es cuadrada. Solo los datos referidos al efecto de la explosión son diferentes, ya que las características de la ubicación del explosivo así lo indican. En este caso los valores correspondientes a la magnitud de la onda de choque y a su impulso serán  $APRP = 38$  psi,  $APSI = 46.8$  psi-ms/lb1/3. La duración del pulso  $t_o = 4.48$  ms. Los datos relativos a los gases de detonación del explosivo son similares a los anteriores. Se realizó una simulación con los datos de la onda de choque solamente para evaluar su influencia en la respuesta del elemento estructural, los resultados de la misma se encuentran reflejados en la Figura 6. Aquí se percibe que la respuesta inducida por

la onda de choque es apreciable. En efecto, su valor de desplazamiento máximo  $x_j^{(max)} = 0.186$  in, al tiempo  $t_m = 10.5$  ms. El máximo desplazamiento está en el período elasto-plástico de la respuesta del elemento, con lo que se asegura su integridad estructural y su estanqueidad. Se condujo luego una segunda simula-

ción tomando en consideración tanto la onda de choque, cuanto la presión producida por los gases de detonación, cuyos resultados están graficados en la Figura 7. Esta combinación de causas genera un desplazamiento máximo de la estructura de  $x_j^{(max)} = 0.366$  in, para el tiempo  $t_o = 15.19$  ms.

Se puede observar en el gráfico resistencia-desplazamiento que el desplazamiento máximo del sistema está en un punto que está ubicado apenas en el comienzo del período plástico con lo que se sigue asegurando globalmente la integridad estructural de la instalación y su capacidad de permanecer estanca después de la explosión. La estructura sigue en el rango de los pequeños desplazamientos. En la Figura 8 se compara la respuesta inducida por la onda de choque solamente y el efecto combinado de onda de choque y gases de detonación del explosivo. Se observa que bajo estas condiciones la respuesta inducida por la onda de choque es de magnitud similar a aquella producida por los gases de detonación. Aquí, las dos fases son importantes.

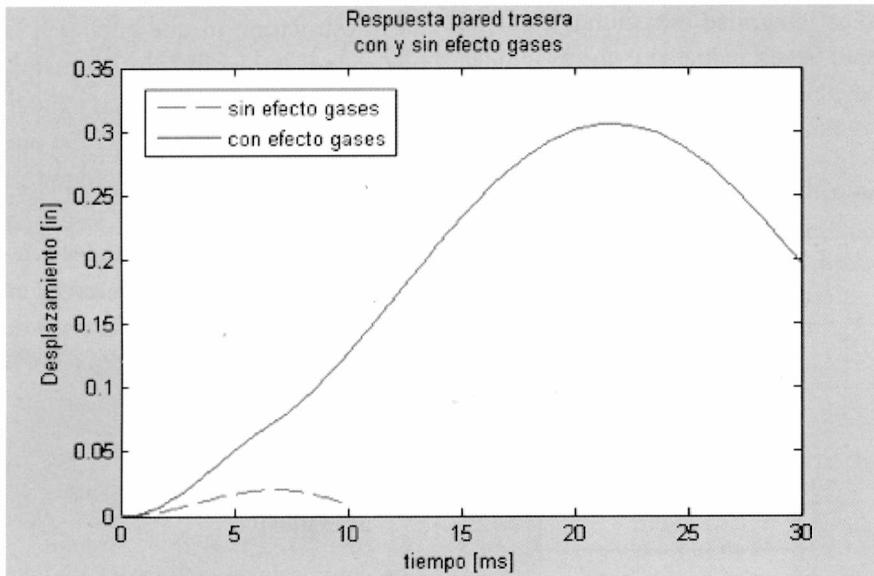


Figura 5. Comparación de la respuesta inducida por la onda de choque y los gases de detonación.

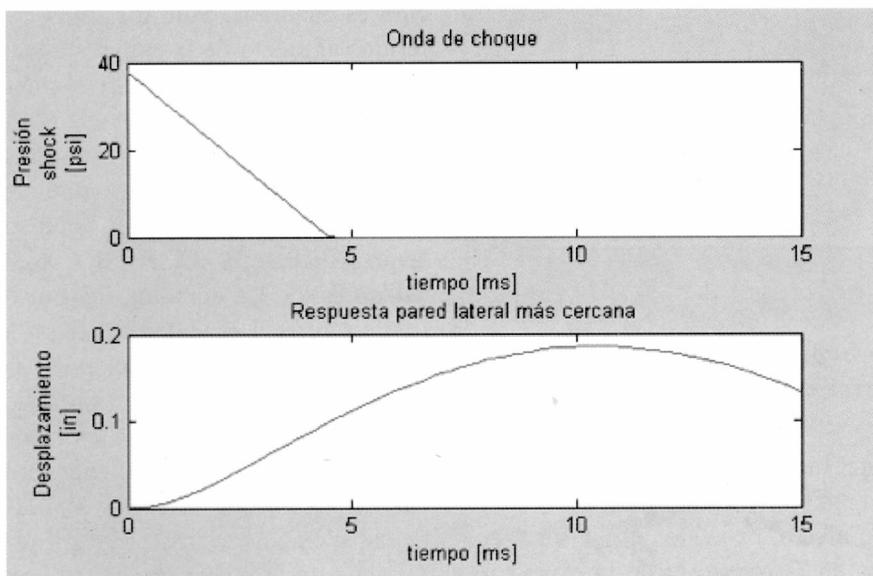


Figura 6. Onda de choque y respuesta de la pared lateral más cercana a la explosión.

### 2.3. Techo

En este caso APRP = 2 psi, APSI = 5 psi-ms/lb1/3, y la duración del pulso  $t_o = 9.1$  ms. Los parámetros asociados a los gases de detonación son similares a los de los dos casos anteriores. Aquí se propone una armadura para el hormigón conformada por barras de acero #8 en una de las direcciones (digamos vertical, recordando que la planta de la instalación es cuadrada) con separación de 5 in oc, similar en la dirección perpendicular a ésta. Si se considera un  $x = L/2$  para que las líneas de fluencia estén a 45°, se obtiene una curva resistencia-desplazamiento graficada en la Figura 9. Nuevamente, los sucesivos puntos de fluencia están indicados en el gráfico. Los valores del coeficiente de carga-masa se obtuvieron en forma similar a aquellos de las paredes con lo que se obtienen los valores de  $K_{LM}(x_j)$  resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del factor de carga-masa para el techo

	Elástico	Elasto-Plástico (dos simples)	Elasto-Plástico (cuatro simples)	Plástico
$K_{LM}$	0.61	0.62	0.63	1

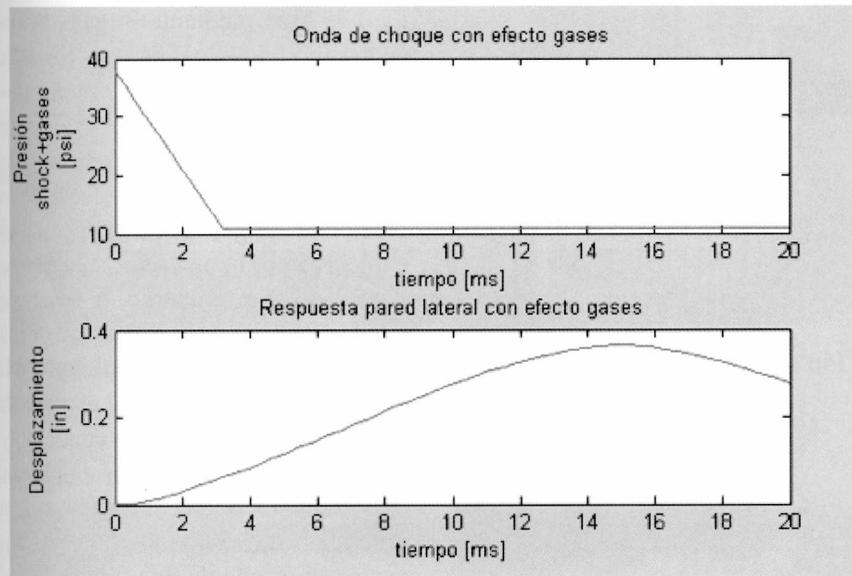


Figura 7. Onda de choque, presión de gases de detonación y respuesta de la pared lateral más cercana a la explosión.

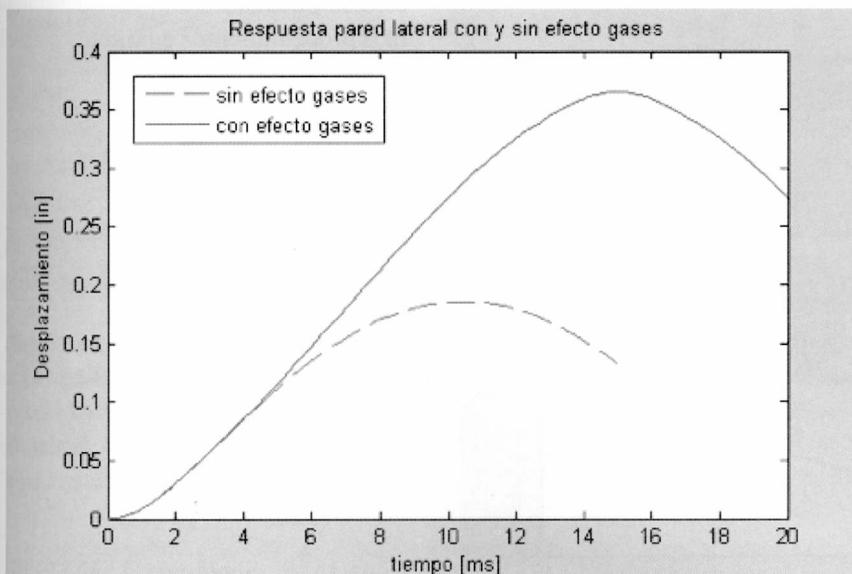


Figura 8. Comparación de la respuesta inducida por la onda de choque y los gases de detonación en la pared lateral.

Ahora la ecuación de equilibrio de momentos deberá ser cambiada para tomar en consideración el efecto del peso propio unitario del elemento estructural, entonces el comportamiento dinámico del techo va a estar definido por el siguiente sistema en modo de espacio de estados:

(6)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = [u(t) - r(x_1)] (1/(K_{LM}(x_1)M)) \end{cases}$$

en donde  $w_c$  es el peso unitario del hormigón por unidad de superficie del techo y vale 1.04 psi/in. Con todos estos valores y utilizando el modelo dado por la Ecuación (6), se realizó una simulación en la que solo se tuvo en cuenta el desplazamiento inducido por la onda de choque, cuyos resultados se vuelcan en la Figura 10. Se puede ver en la figura que el desplazamiento inducido por la onda de choque es muy pequeño, en efecto el desplazamiento máximo del elemento será  $x_1^{(max)} = 0.0067$  in, que se produce a  $t_o = 8.34$  ms. Si se observa la curva resistencia-deformación se ve que la estructura se encuentra en el período elástico. Luego se realizó una segunda simulación en la que se consideró el efecto combinado de la onda de choque y los gases de detonación del explosivo que dio los resultados mostrados en la Figura 11. Se puede apreciar en la figura que la magnitud de los desplazamientos inducidos por la acción de los gases de detonación es de considerable magnitud, una comparación con los desplazamientos producidos solo por la onda de choque, muestra que la contribución de esta última puede ser despreciada. Esto se ve, asimismo en la Figura 12. La diferencia entre la respuesta debida a la onda de choque y aquella inducida por los gases de detonación del explosivo es tan grande en este caso que el gráfico de comparación tuvo que hacerse en

escala logarítmica. El máximo desplazamiento para esta condición de carga es  $x_l^{(max)} = 3.34$  in, produciéndose a  $t_o = 71.9$  ms. Si observamos el gráfico resistencia-desplazamiento correspondiente al techo vemos que el valor

de desplazamiento máximo está bien dentro del período elasto-plástico garantizándose así la integridad estructural y la estanqueidad del elemento. El elemento está bien dentro de la zona de deformaciones reducidas.

### 3. Conclusiones

Se ha llegado a realizar un análisis y diseño preliminar de una estructura de contención totalmente estanca a pesar de que este no es un caso contemplado en los manuales de diseño. Esto se hizo mediante la generación de un modelo dinámico no lineal a partir de los criterios de diseño dados por el UFC [2]. Los resultados de esas simulaciones ponen en evidencia la importancia central del efecto de la presión de los gases de detonación del explosivo en un ambiente totalmente confinado. Sin embargo, a pesar de ello la dinámica de la expansión de los gases de detonación de un explosivo en un ambiente totalmente estanco es un fenómeno no muy bien conocido y cuantificado y los métodos empíricos existentes son poco confiables para la obtención de resultados que puedan usarse en diseño de este tipo de instalaciones [1]. Es por esto que se hace necesario un estudio exhaustivo de la interacción entre los gases de detonación de un explosivo y un ambiente totalmente confinado. Una vez hecho esto se pueden derivar de dicho análisis procedimientos empíricos para el diseño de este tipo de estructuras.

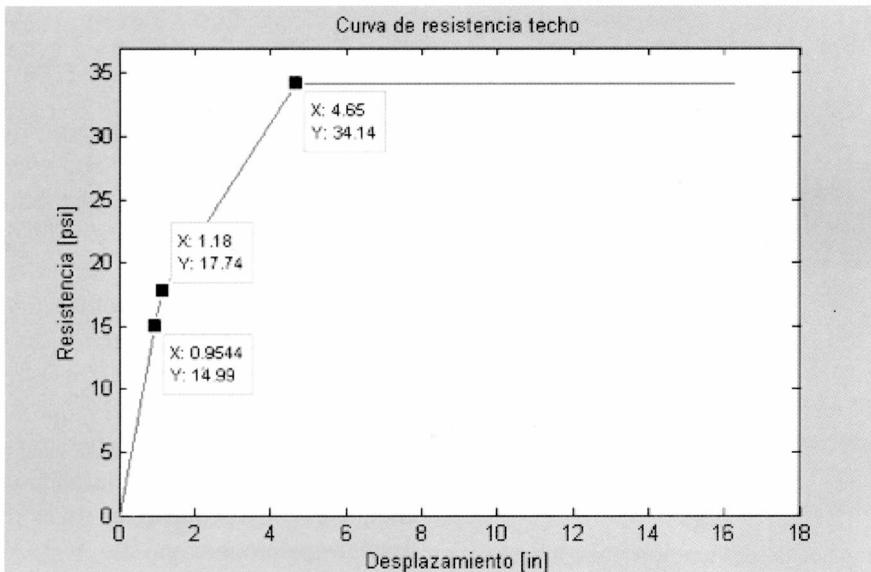


Figura 9. Curva resistencia-desplazamiento para el techo.

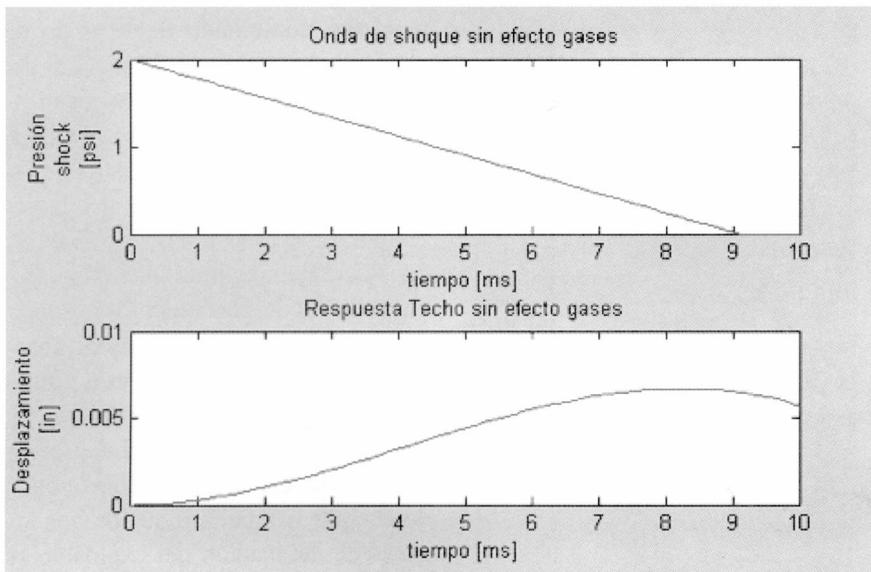


Figura 10. Onda de choque y respuesta del techo.

### 4. Referencias

Krauthammer, Theodor. (2008). *Modern Protective Structures*. Boca Ratón. CRC Press. Florida.

Departamento de Defensa de los Estados Unidos. (2008). *Unified Facilities Criteria. Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions* UFC 3-340-02.

Bogacki, P.; Shampine, L. F. (1989). *A 3(2) pair of Runge-Kutta formulas*. Appl. Math. Letters. Volumen 2, pp 1-9.

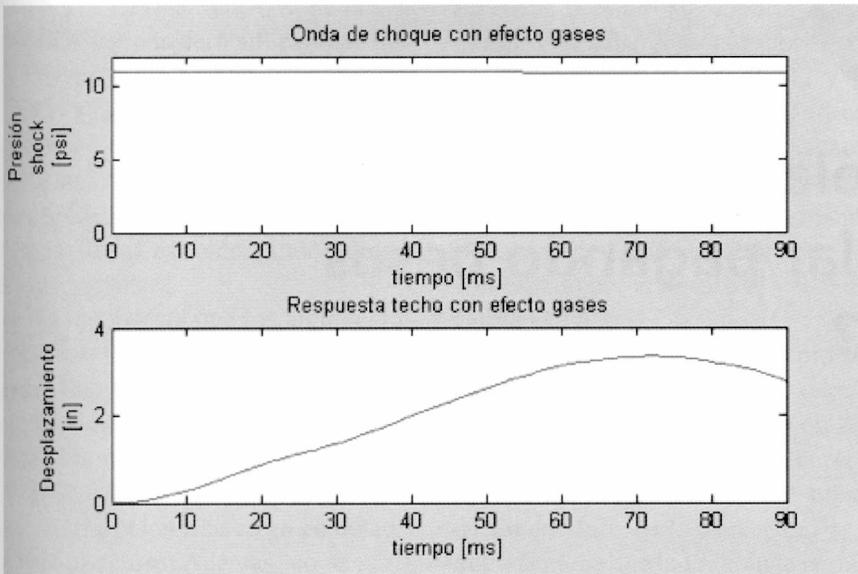


Figura 11. Onda de choque de los gases de detonación y respuesta del techo.

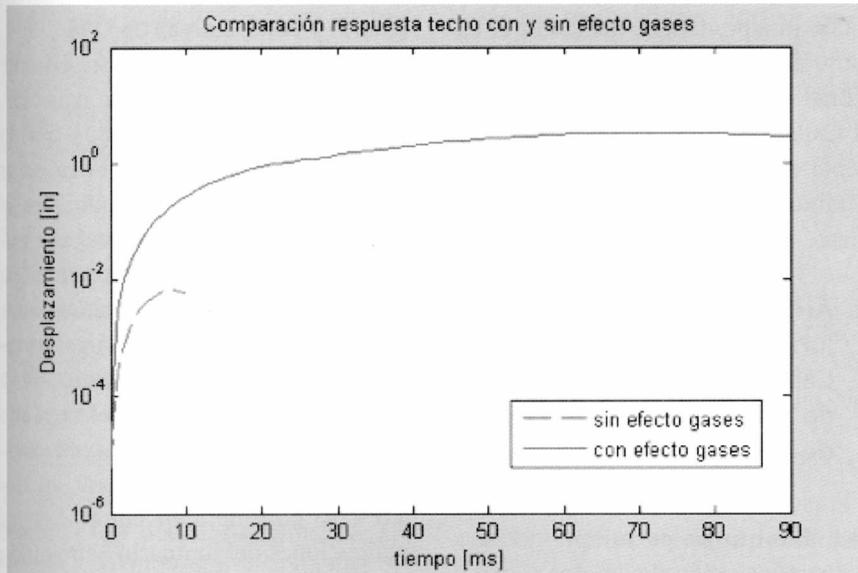


Figura 12. Comparación de la respuesta inducida por la onda de choque y los gases de detonación en el techo.

Altenberg, A. E., (1996). *Full Blast Wave Effects on Glazing*. M.S. Thesis in Civil Engineering. The Pennsylvania State University.

Krauthammer, Theodor; Altenberg, Adolfo. (1996). *Full Blast Wave Effects on Glazing*. Proc. Specialty Symposium on Structures Response to Impact and Blast. Tel Aviv, Israel.

Altenberg, Adolfo; Krauthammer, Theodor. (1996). *Blast Effects on Light Nonstructural Components*. Proc. 27th Department of Defense Explosive Safety Seminar. Las Vegas, Estados Unidos.

Krauthammer, T., and Altenberg, A. E. (2000). *Assessing Negative Phase Blast Effects on Glass Panels*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, No. 1, ps. 1-17, January.