

## EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS EN AMBIENTES URBANOS

**Bibiana M. Luccioni<sup>a,c</sup>, Ricardo D. Ambrosini<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup>*Instituto de Estructuras, , Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, [bluccioni@herrera.unt.edu.ar](mailto:bluccioni@herrera.unt.edu.ar), <http://www.herrera.unt.edu.ar/iest>*

<sup>b</sup>*Maestría en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo Centro Universitario -Parque Gral. San Martín - 5500 Mendoza, [dambrosini@uncu.edu.ar](mailto:dambrosini@uncu.edu.ar)  
<http://fing.uncu.edu.ar/academico/posgrados/estructural/maestria-en-ingenieria-estructural>*

<sup>c</sup> *CONICET, Argentina*

**Keywords:** Explosión, onda de presión, impulso, detonación, simulación numérica.

**Abstract.** En general, los trabajos de investigación relacionados con explosiones han estado orientados hacia dos objetivos distintos: proteger estructuras nuevas o existentes frente a posibles ataques con cargas explosivas o, en los casos de ataques ya producidos, inferir las características de la carga explosiva (magnitud, forma, posición, etc.). En cualquiera de los casos el análisis de la propagación de la onda explosiva y su efecto en las estructuras pueden realizarse mediante hidrocódigos. Sin embargo, la simulación precisa de todo el ambiente urbano alcanzado por la explosión es aun un desafío ya que resulta computacionalmente muy costosa. Debido a ello, generalmente se hacen simplificaciones en los modelos respecto a la forma de la carga, puntos de detonación, posición de los edificios, simetría, etc., que pueden conducir a errores importantes sobre todo cuando se trata de inferir la carga explosiva usada en un ataque.

En este trabajo se estudia numéricamente el efecto de distintos factores que intervienen en la onda de presión resultante de una explosión y su efecto en las estructuras en un ambiente urbano. Las conclusiones del análisis presentado resultan útiles cuando se intenta lograr resultados confiables sin aumentar excesivamente el volumen de cálculo computacional.

Se presentan las herramientas utilizadas y se analizan aspectos de la simulación numérica que contribuyen a la precisión de los resultados obtenidos. Se describen y ejemplifican aquellos factores más importantes que influyen en el efecto de una carga explosiva. El trabajo se completa con comparaciones con resultados experimentales que muestran la validez de los análisis realizados.

## 1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la acción de cargas explosivas ha despertado interés en los últimos años debido a la gran cantidad de sucesos accidentales e intencionales que afectaron estructuras en el mundo entero, indicando la relevancia del tema en el diseño estructural y en el análisis de confiabilidad. Como consecuencia de ello, se han desarrollado investigaciones extensas en el campo de las cargas explosivas durante las últimas décadas (Alia y Souli, 2006). Estas investigaciones son importantes no sólo porque permiten entender el daño producido por explosiones en las construcciones, sino porque, a su vez, permiten predecir la vulnerabilidad de las estructuras y los seres humanos a las explosiones y desarrollar materiales resistentes a las explosiones y elementos de protección (Hargather y Settles, 2009).

En general, los trabajos de investigación en esta área han estado orientados hacia dos objetivos distintos (Sorensen y McGill 2011): proteger estructuras nuevas o existentes frente a posibles ataques con cargas explosivas o, en los casos de ataques ya producidos, inferir las características de la carga explosiva (magnitud, forma, posición, etc.) (Ambrosini et al. 2005, Luccioni et al 2005). Alcanzar el primer objetivo, implica minimizar el daño y evitar el colapso estructural frente a cargas desconocidas, lo cual resulta prácticamente irrealizable. En general, a los efectos de proteger los edificios que representan blancos potenciales de ataque, se ha intentado limitar de alguna forma la aproximación de vehículos que pudieran transportar explosivos a los mismos o diseñar elementos de protección que de alguna manera disminuyan la presión incidente sobre las estructuras (Remennikov y Rose 2007).

Este trabajo está relacionado fundamentalmente con la segunda aplicación, es decir, la determinación de la carga explosiva a partir de los daños. Una de las evidencias más claras luego de un ataque con cargas explosivas es el cráter formado. La presencia de un cráter permite fijar con certeza la posición en planta de la carga explosiva pero no la posición en altura, dato que puede tener importancia en la investigación. Por otro lado, aún cuando se haya formado un cráter y el mismo no haya sido tapado por los escombros o alterado con posterioridad al atentado, la variabilidad de resultados que se pueden obtener es alta (Bull and Woodford 1998, Kinney y Graham 1985). Se sabe que, debido a que las dimensiones del cráter están relacionadas con la raíz cúbica de la carga, una pequeña diferencia en las dimensiones del cráter significa grandes diferencias en la carga. Debido a esto, es siempre necesario recurrir al análisis de los daños en construcciones de los alrededores para poder precisar mejor las características de la carga explosiva.

En los últimos años, el rápido desarrollo del hardware, unido al desarrollo de programas integrados de fluido dinámica, permite realizar estas simulaciones en computadoras personales aumentando notablemente la capacidad de estos métodos. De esta manera, se pueden tener en cuenta efectos importantes como las múltiples reflexiones, el efecto match y la fase negativa de la onda de presión que, en general, no pueden ser tenidos en cuenta en forma realista mediante métodos simplificados.

Sin embargo, es conocido que la precisión de los resultados numéricos obtenidos con este tipo de programas depende fuertemente del tamaño de la discretización utilizada que, por otro lado, está condicionada por las dimensiones del modelo y la capacidad de las computadoras (Luccioni et al. 2006). A su vez, cuando se analiza la respuesta estructural mediante estos programas se deben tener en cuenta dos puntos importantes. El primero está vinculado con la necesidad de validar experimentalmente los modelos y procedimientos de análisis utilizados. El segundo aspecto está relacionado con el costo computacional que hace prácticamente imposible simular un edificio real, por ejemplo de hormigón armado, con todos sus detalles y el ambiente urbano circundante. No debe perderse de vista que en este tipo de análisis se deben tener en cuenta dos fenómenos con escalas de tiempo que difieren entre sí en varios

órdenes de magnitud. La explosión y la propagación de la onda de presión se producen en milésimas de segundo y el colapso completo de una estructura de varios pisos requiere algunos segundos. Son justamente estos los desafíos que presenta la realización de los modelos computacionales para simular numéricamente este tipo de problemas (Luccioni et al. 2004a, Luccioni et al. 2004b).

Como una alternativa, en general el problema se analiza en varias etapas: la generación de la explosión, la propagación de la onda de presión en el ambiente urbano y su acción sobre las construcciones. Este trabajo está referido exclusivamente a las dos primeras etapas de análisis de cuya precisión depende fuertemente la confiabilidad de los resultados obtenidos en la última etapa. A los efectos de minimizar el volumen de cálculo y aumentar la precisión de los resultados estas dos etapas de análisis se llevan a cabo en forma secuencial, generando la explosión en un modelo muy fino, generalmente unidimensional (esférico) o bidimensional (cilíndrico) y luego mapeando los resultados en un modelo bidimensional o tridimensional. Si bien esta estrategia permite disminuir el tiempo computacional, el uso de la misma hace imposible considerar la forma real de la carga, la ubicación de los puntos de detonación, la presencia de distintos obstáculos o barreras y otros aspectos que no pueden ser simulados más que en modelos tridimensionales. En este trabajo se estudia numéricamente el efecto de estos factores que intervienen en la onda de presión resultante de una explosión y su efecto en las estructuras en un ambiente urbano.

A continuación, se describen los aspectos más importantes de la simulación numérica de este tipo de problemas, principalmente aquellos relacionados con la precisión de los resultados. A modo ilustrativo, se presentan comparaciones con resultados experimentales que muestran la importancia de la consideración de estos aspectos.

## 2 HERRAMIENTA NUMÉRICA

El análisis numérico se realiza con el hydrocódigo ANSYS/Autodyn (V.13). Para poder realizar un análisis comparable la masa de explosivo se define como masa equivalente de TNT. Es decir que los resultados que se pueden obtener de la metodología propuesta no permiten determinar el tipo de explosivo sino la masa equivalente de TNT. La masa correspondiente a otros explosivos puede obtenerse mediante el concepto de equivalencia de TNT (Formby and Wharton, 1996).

En general, en todas las escalas de análisis, el problema es simulado en dos etapas. En la primera etapa se simula la explosión con mucho detalle mediante un modelo esférico o cilíndrico con una discretización muy fina. Esta primera simulación se extiende desde el momento de la detonación hasta unos instantes antes de que la onda de presión se encuentre con el suelo si el modelo es esférico o con una pared si el modelo es cilíndrico. Estos modelos abarcan únicamente al explosivo y el aire circundante. Luego, los resultados de este primer análisis fino son mapeados en un modelo bidimensional o tridimensional más grueso pero que abarca una zona más grande. Este segundo modelo permite analizar la propagación de la onda de presión y su interacción con las construcciones. Por limitaciones del software de cálculo, este proceso de mapeo sólo puede hacerse desde un modelo 2D a otro 2D o 3D o sea, cuando la carga es esférica o cilíndrica o cuando la misma puede aproximarse como tal.

Para modelar el aire y el explosivo en la primera etapa o cuando no puede descomponerse el análisis, se utiliza un procesador Euler Godunov multi material. Para modelar la propagación de la onda de presión en la segunda etapa se utiliza un procesador Euler FCT. En estas primeras etapas de análisis en las que interesa modelar la onda de presión con precisión, las estructuras se simulan como elementos rígidos.

Para el aire se utiliza la ecuación de estado del gas ideal. Para modelar tanto la detonación

como la expansión del explosivo (TNT) se usa la ecuación de estado de Lee-Tarver (Lee and Tarver, 2008) en conjunción con la ecuación de estado Jones - Wilkins - Lee (JWL EOS) para modelar el explosivo sin reaccionar.

Se admite el flujo de aire y TNT hacia fuera del modelo a través de los límites del mismo para representar un medio ilimitado para problemas de propagación de ondas. Esta condición de borde permite a la onda propagarse a través del borde del modelo sin reflejarse, evitando la necesidad de modelos muy grandes. Sin embargo, se debe mantener los bordes lejos de la zona de interés porque esta condición de borde aproxima bien la situación de medio semi-infinito para ondas que inciden normalmente al borde. Esto trae como consecuencia la aparición de reflexiones espurias que se pueden evitar alejando los bordes de la zona de interés.

### 3 EFECTO DEL REFINAMIENTO DE LA MALLA

#### 3.1 Introducción

Cuando un explosivo es detonado en aire, se produce una onda de presión caracterizada por un repentino incremento de presión, seguido de una caída exponencial y una fase negativa, por debajo de la presión atmosférica. La forma más difundida de escalar los parámetros de la onda de presión es la ley de Hopkinson (Baker et al 1983) que establece que cuando se detonan dos cantidades distintas del mismo explosivo, a distancias escaladas iguales se producen ondas de presión idénticas. De esta forma, cualquier distancia  $R$  (m) de una carga explosiva  $W$  (kg) puede ser transformada en una distancia característica escalada  $Z$ :

$$Z = R/W^{1/3} \quad (1)$$

donde  $W$  es la masa de explosivo expresada en kg de TNT. El uso de  $Z$  permite representar en forma eficiente y comparar los resultados de los ensayos experimentales y simulaciones numéricas aún cuando no correspondan a la misma cantidad de explosivo.

Existen numerosas soluciones para los parámetros de la onda de presión generada por cargas esféricas en campo libre o semiesféricas apoyadas sobre el terreno. En general, esos resultados se presentan en forma de ecuaciones o tablas (Kinney and Graham 1985, Smith and Hetherington 1994) como la siguiente,

$$\frac{p_s}{p_o} = \frac{808 \left[ 1 + (Z/4.5)^2 \right]}{\sqrt{1 + (Z/0.048)^2} \sqrt{1 + (Z/0.32)^2} \sqrt{1 + (Z/1.35)^2}} \quad (2)$$

donde  $p_o$  es la presión atmosférica y  $p_s$  es el pico de sobrepresión.

La precisión de estas fórmulas en el campo cercano es más pobre que en el campo lejano, probablemente debido a la complejidad del fenómeno (Smith and Hetherington 1994). Esta observación es particularmente importante para explosiones grandes para las cuales, aún a grandes distancias del foco de la explosión, las distancias escaladas son pequeñas, ver Ec. (1).

Cuando la onda de presión encuentra una superficie infinita sobre la que incide formando un ángulo recto se refleja. El flujo detrás de la onda se detiene y las presiones resultan considerablemente mayores que las incidentes. Existen también formulas empíricas, tablas y gráficos para obtener la presión reflejada. Sin embargo, el caso más usual es que las ondas incidan en forma oblicua sobre las superficies. Para ángulos entre 0 y 90°, se produce

reflexión regular o Mach dependiendo del ángulo de incidencia y la magnitud del shock (Baker et al 1983, Smith y Hetherington 1994). La evaluación de las presiones reflejadas resultantes de múltiples reflexiones sobre superficies con diferentes ángulos de incidencia es muy complicada y difícil de realizar en forma analítica o empírica y requiere la simulación numérica.

Es bien conocido que la precisión de los resultados de la simulación numérica de la onda de presión depende fuertemente del tamaño de la malla utilizada (Luccioni et al. 2006), más precisamente del tamaño escalado de la malla (Luccioni y Ambrosini 2010) definida como el tamaño de la malla dividido por la raíz cúbica de la masa de explosivo en equivalente de TNT. Adicionalmente, se puede probar que los resultados numéricos de la propagación de la onda de presión son más sensibles al tamaño de la malla en el campo cercano que en el campo lejano (Luccioni et al. 2006). Como consecuencia de ello, el tamaño adecuado de la malla depende de la masa de explosivo y de la distancia donde se quieren evaluar los parámetros de la onda de presión

Algunos trabajos previos (Luccioni et al. 2006) y su comparación con resultados de formulas empíricas existentes (Smith & Hetherington 1994, Baker et al. 1983, Kinney & Graham 1985) para la evaluación de las sobrepresiones incidentes han demostrado que mallas gruesas de hasta 500mm son apropiadas para una análisis comparativo del efecto de cargas explosivas en edificios situados en un ambiente urbano. Pueden tener errores importantes pero resultan útiles para comparar diferentes alternativas de la carga explosiva y siempre conducen a mejores resultados que las formulas empíricas simplificadas.

Muchos investigadores han probado también que, en comparación con resultados experimentales, se obtienen mejores resultados para los impulsos que para las sobrepresiones (Luccioni et al. 2006, Zhou & Hao 2008). Pareciera ser que los modelos numéricos tienen mayor dificultad para capturar el pico de sobrepresión en el campo cercano que el resto de la onda presión y esta limitación es aún más notoria en el caso de las presiones reflejadas. En general, esto no representa un inconveniente cuando se estudia el daño en las construcciones ya que se puede demostrar que el mismo está principalmente definido por los valores del impulso más que de la presión.

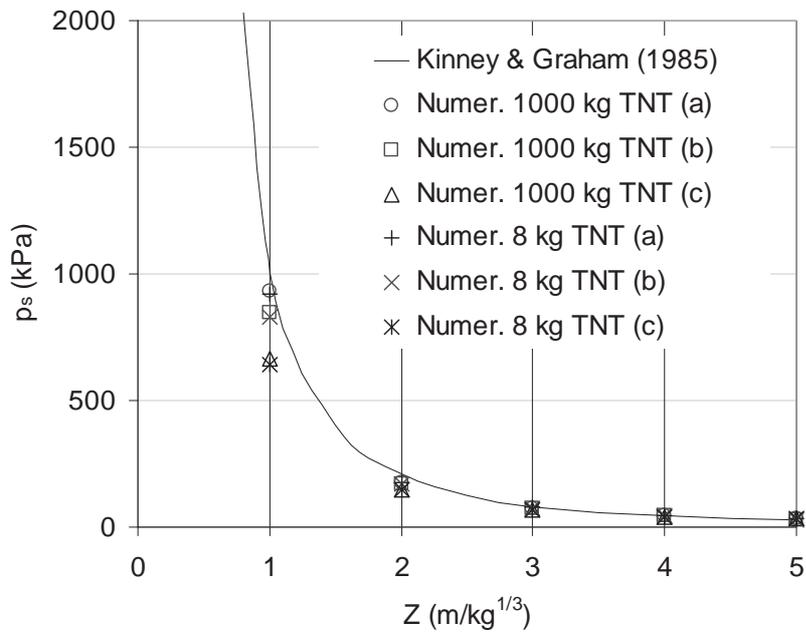
### 3.2 Presiones e impulsos incidentes

Como ilustración, se muestran en las Figura 1 algunas comparaciones entre valores numéricos y experimentales de sobrepresión pico incidente. En todos los casos los ejemplos corresponden a explosivos cilíndricos elevados a una cierta altura sobre el suelo. Los resultados cubren un rango grande de masas explosivas y distancias, por esa razón han sido representados como una función de la distancia escalada  $Z = R/W^{1/3}$ .

La curva en la Figura 1a representa los resultados empíricos de Kinney & Graham (1985), Ec.(2), para cargas esféricas y propagación libre. Los resultados numéricos fueron obtenidos con modelos bidimensionales (cilíndricos) y corresponden a cargas cilíndricas de 8 kg TNT a 0.35 m de altura y 1000 kg de TNT a 1.75 m de altura. Se observa que entre ambos problemas existe un factor de escala  $s = 5$ . En la Figura 1a se presentan los resultados numéricos correspondientes a tres tamaños de malla escalados ( $Z_m = \text{Tamaño malla}/W^{1/3}$ ) diferentes: (a)  $Z_m = 0.01 \text{ m/kg}^{1/3}$ , (b)  $Z_m = 0.02 \text{ m/kg}^{1/3}$ , (c)  $Z_m = 0.05 \text{ m/kg}^{1/3}$ . Es claro que cuanto menor es el tamaño escalado de la malla, se obtienen valores de sobrepresión mayores, más cercanos a los empíricos y además los resultados obtenidos para un mismo tamaño escalado de malla son coincidentes. En la Figura 1b se presenta la comparación de los resultados numéricos obtenidos con  $Z_m = 0.01 \text{ m/kg}^{1/3}$  con los experimentales. Se verifica que los

resultados numéricos se aproximan a los experimentales para distancias escaladas mayores e incluso los superan. Esto último, en general, es resultado de un efecto de reflexión espurio en los bordes de la malla que empieza a sumarse al frente de onda para distancias grandes. Para eliminar estos efectos, se debe trabajar con mallas suficientemente grandes, alejando los bordes de los puntos en donde se debe medir la presión.

a)



b)

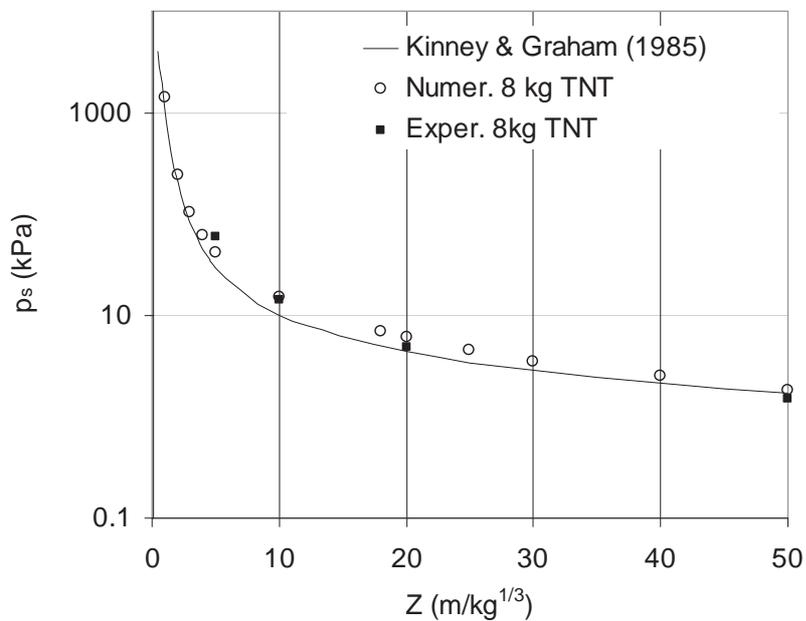


Figura 1. Sobrepresión pico incidente en función de la distancia escalada. a) Efecto del tamaño escalado de la malla; b) Comparación con resultados experimentales

Como validación adicional se presentan los resultados numéricos de la simulación de la detonación de una carga cilíndrica de 2 kg de TNT, de 150mm de diámetro y 72 mm de altura apoyada en el suelo y detonada en el centro de su cara superior. Este problema se analiza en dos etapas: la generación se hace en una malla cilíndrica de 2mx2m muy fina ( $Z_m = 0.004 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) y luego, antes de que la onda de presión llegue a los bordes libres, se mapea en una malla más gruesa ( $Z_m = 0.04 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) de 50m de largo por 20m de altura para estudiar la propagación de la onda de presión. En la **Figura 2** se muestran los valores de presión incidente obtenidos a distintas distancias escaladas  $Z$  y alturas  $h$  y su comparación con los resultados experimentales. En la **Figura 3** se muestra la variación de la presión en el tiempo obtenida numéricamente en distintos puntos y su comparación con la registrada experimentalmente. En ambos casos se observa una buena concordancia entre resultados numéricos y experimentales. Es claro que la simulación numérica reproduce con bastante precisión, no solo el pico de sobrepresión, sino también el tiempo de llegada de la onda de presión, la duración de la fase positiva y la forma de la onda de presión.

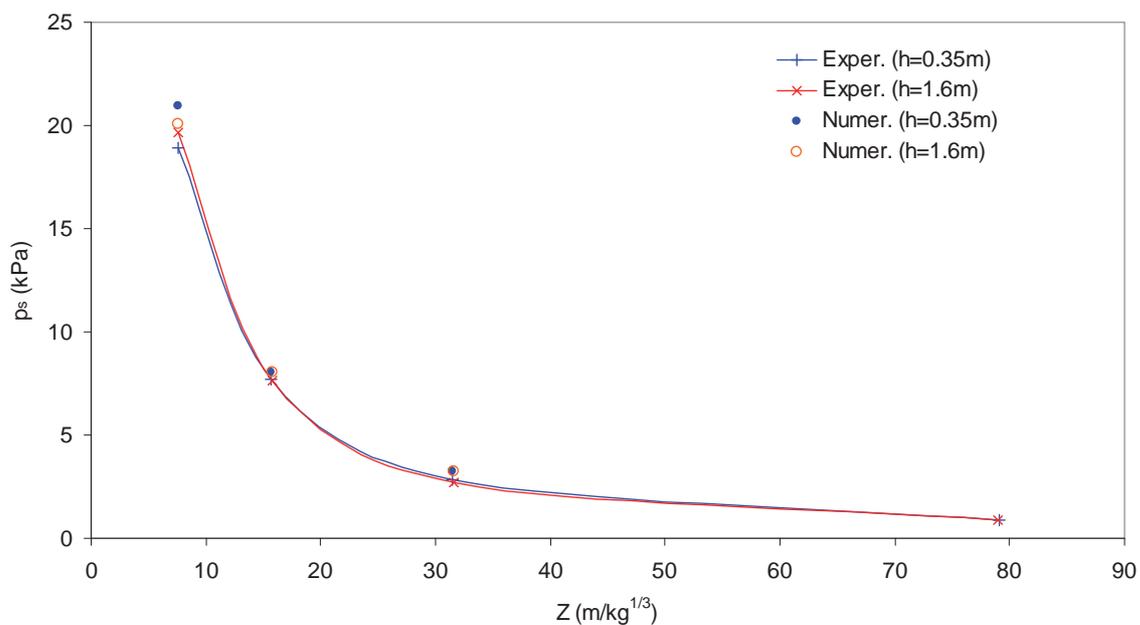


Figura 2. Sobrepresión pico incidente en función de la distancia escalada ( $W = 2\text{kg TNT}$ )

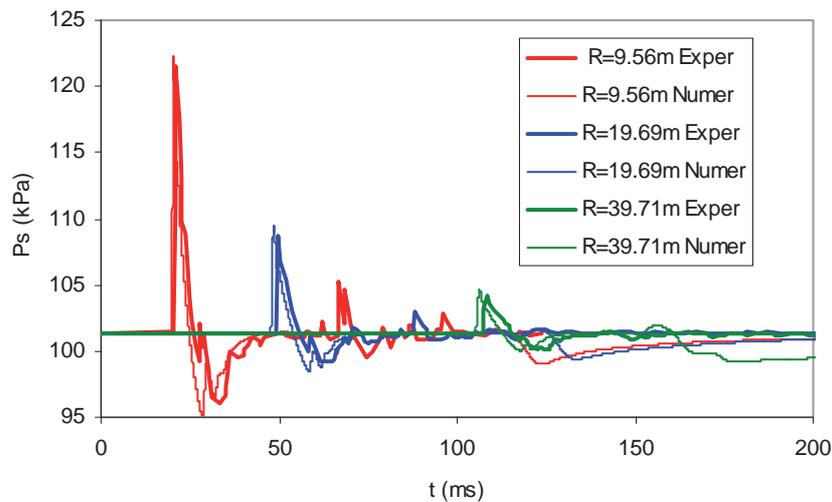


Figura 3. Historias de presión a una altura  $h$  de 0.35m y distintas distancias  $R$  de una carga explosiva de 2kg de TNT ubicada sobre el suelo. Comparación de resultados numéricos y experimentales.

### 3.3 Presiones e impulsos reflejados

En esta sección simulan numéricamente distintos ensayos con cargas explosivas en los que se mide la presión reflejada. En la [Figura 4](#) se presenta la comparación de los resultados numéricos y experimentales de presión reflejada.

Los resultados de [Schenker et al. \(2008\)](#) representan la sobrepresión reflejada producida a una distancia de 20m por una carga hemisférica de 1000kg de TNT ubicada sobre el suelo.

Los resultados de [Kwasniewski et al. \(2010\)](#) corresponden a los valores de sobrepresión reflejada producidos a distancias de 0.4m y 1.0m por cargas hemisféricas de 78g de PE4 ubicadas a una cierta altura del suelo.

El resultado de [Tanapornraweekit et al. \(2007\)](#) representa la sobrepresión pico reflejada producida a una distancia de 40m de una carga cilíndrica de 5000 kg de TNT ubicada sobre el terreno.

Se observa que en todos los casos los resultados numéricos reproducen razonablemente los resultados experimentales. Sin embargo, para distancias escaladas bajas (campo cercano) las presión reflejada obtenida numéricamente es algo menor que la experimental.

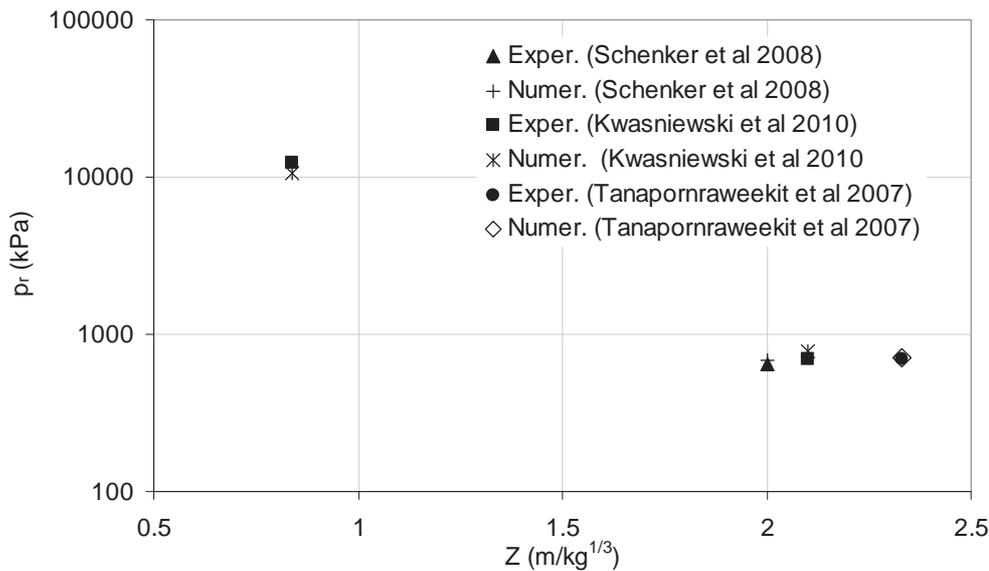


Figura 4. Sobrepresión pico reflejada como función de la distancia escalada. Comparación de resultados numéricos y experimentales

#### 4 EFECTO DE LOS EDIFICIOS EN AMBIENTES URBANOS

Cuando la onda de presión se encuentra con paredes, se producen reflexiones que aumentan el valor de la presión y los impulsos asociados en coincidencia con las paredes y en lugares más alejados. Este efecto en la bibliografía se denomina algunas veces efecto cañón. Normalmente, se espera que el pico de presión y el impulso positivo se incremente en calles angostas con edificios más altos en comparación con calles más anchas con edificios más bajos (Rose y Smith 2002).

Para evaluar el efecto de las paredes en la propagación de la onda se simula el caso de una carga explosiva detonada en una calle con o sin paredes laterales. El modelo utilizado se muestra en la Figura 5. El modelo corresponde a un segmento de una calle de 30m longitud. La distancia entre las paredes de los edificios a ambos lados de la calle es de 36 m. Los puntos rojos indican los puntos de medición de las sobrepresiones ubicados a 2m de altura sobre el suelo. Las paredes corresponden a  $y=0$  (pared 1) e  $y=36\text{m}$  (pared 2). Se estudia el efecto de paredes ciegas de 3, 6 y 10m de altura y se comparan con pórticos o paredes con aberturas. La carga explosiva utilizada en este caso corresponde a 2500 kg de TNT ubicados a 0.8m del suelo en el punto  $x=0$ ,  $y=10\text{m}$ .

En la Figura 6 se presenta la comparación de las historias de presión en el tiempo obtenidas en puntos situados sobre una línea correspondiente a  $x=0$  (a través de la calle en correspondencia con el centro del explosivo) para distintos casos: con ambas paredes, sólo la pared 1, sólo la pared 2 y sin paredes. Los registros corresponden a paredes de 6m de altura. Puede notarse que la onda de presión se refleja en las paredes aumentando el valor de la presión correspondiente en coincidencia con la pared. En los otros puntos, la onda de presión que se produce por efecto de la reflexión aparece desfasada respecto de la onda principal y, en el caso analizado, sobre  $x=0$  el pico es siempre menor o igual al de la onda principal, aunque para  $y=34\text{m}$  prácticamente lo iguala.

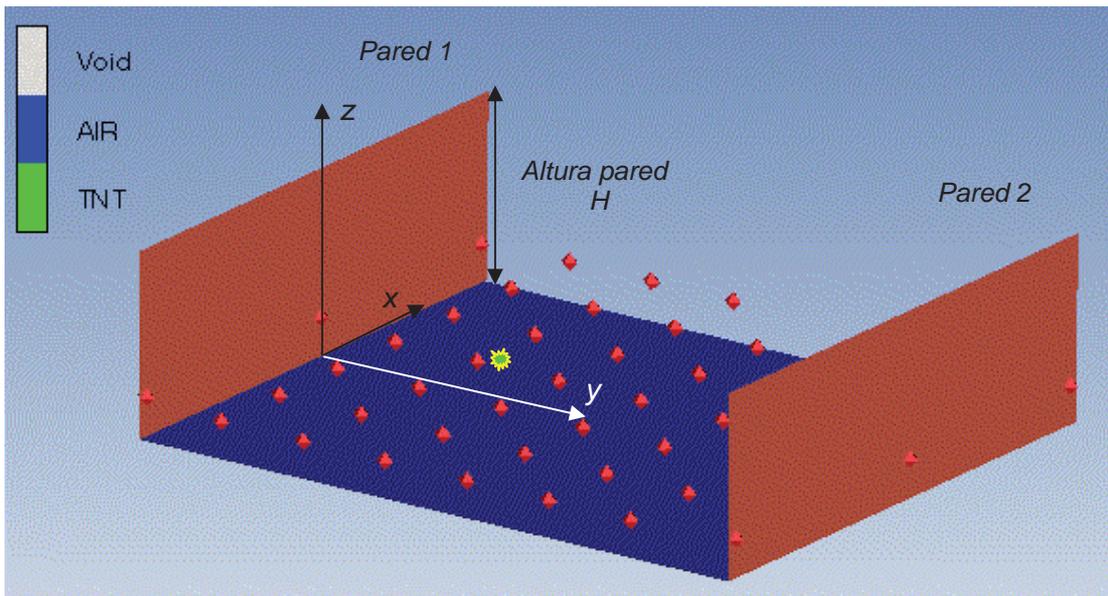


Figura 5. Modelo numérico para estudiar propagación de la onda de presión

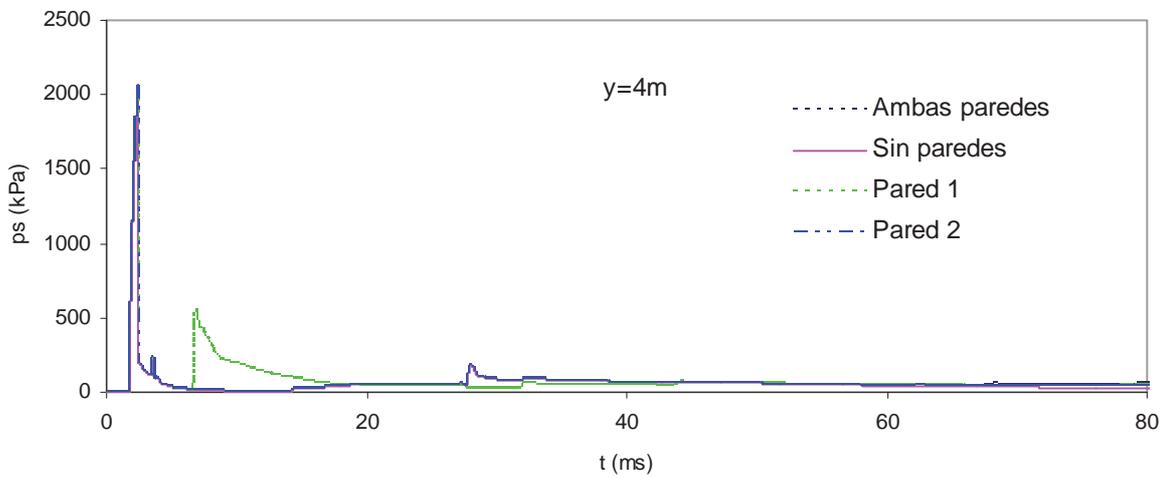
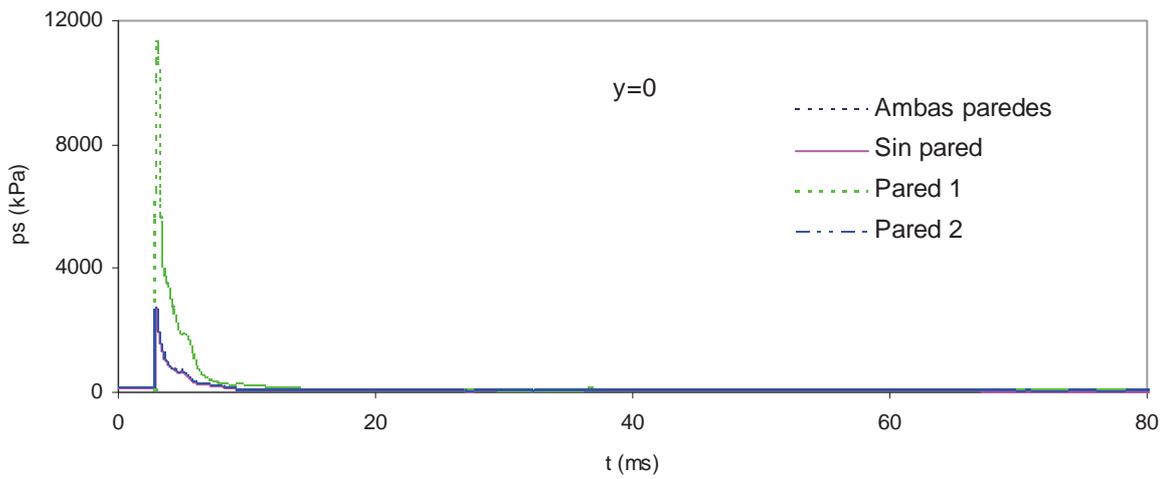


Figure 6. Historias de presión a través de la calle

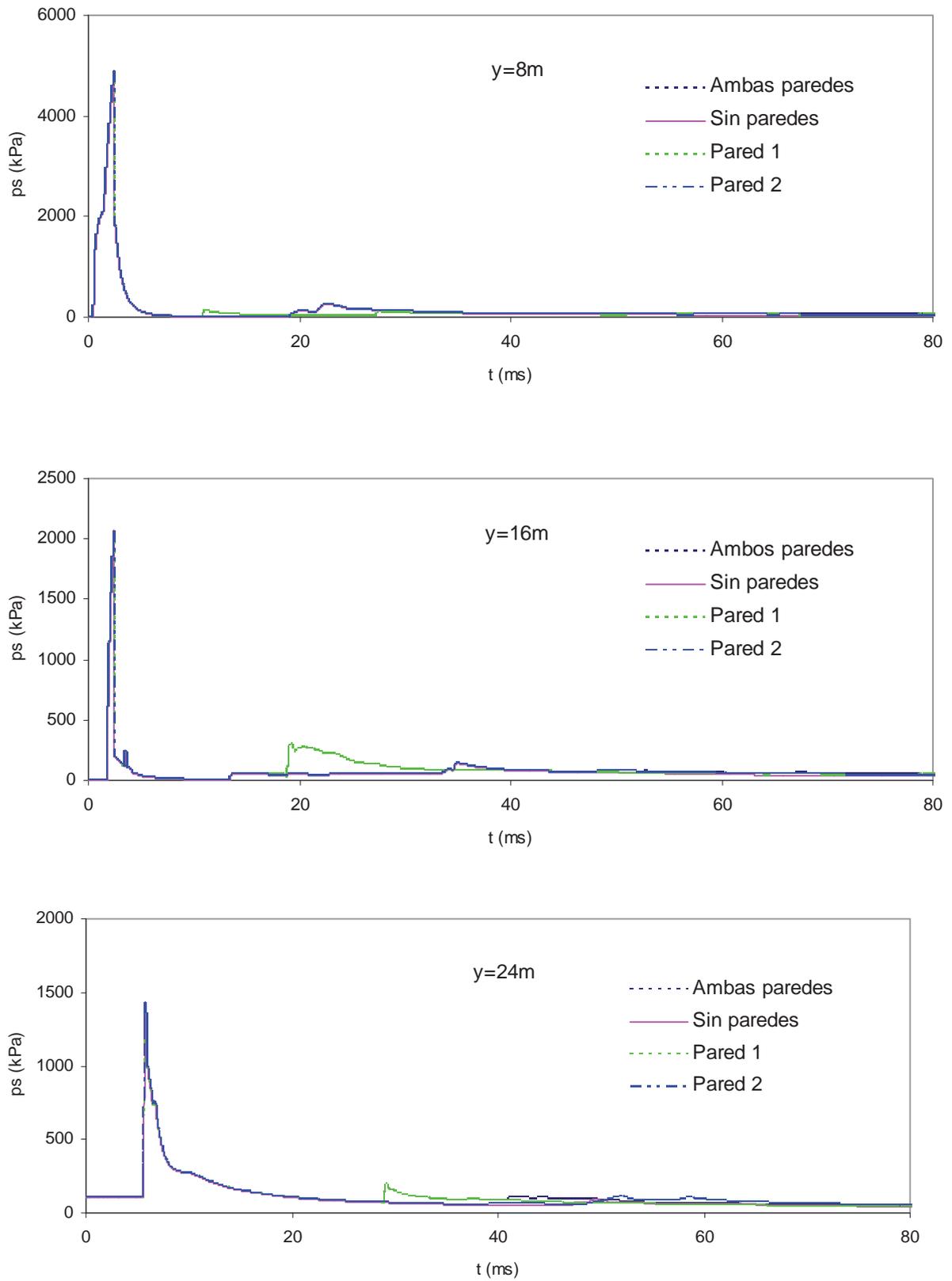


Figure 6. Historias de presión a través de la calle (Cont.)

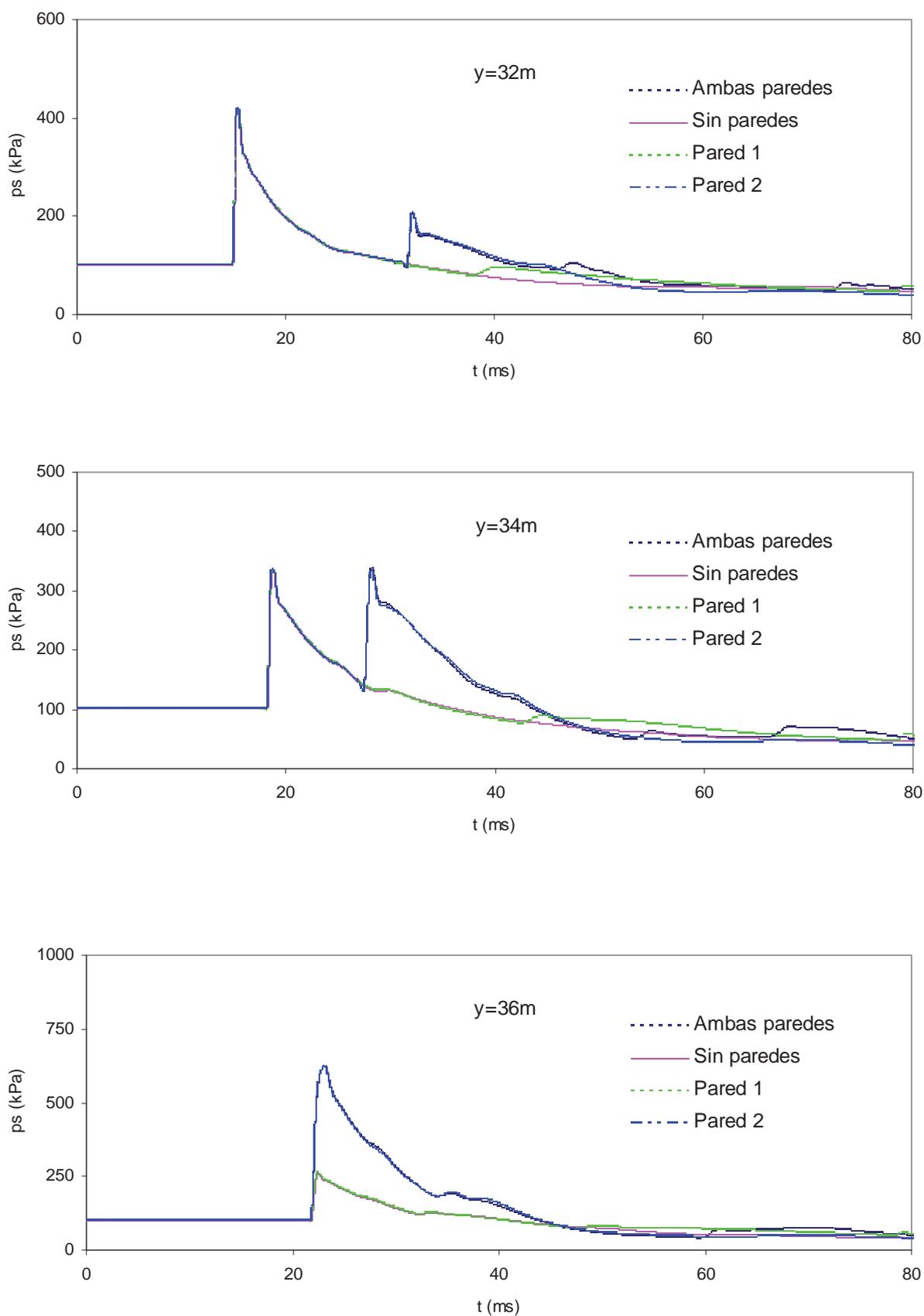


Figura 6. Historias de presión a través de la calle (Cont.)

En la **Figura 7** se muestra la variación del impulso a lo largo de la calle ( $y=const$ ) para los distintos casos simulados: ambas paredes, sin paredes, pared 1 y pared 2. Se grafican los valores referidos al caso de propagación libre (sin paredes). Debe observarse que la presión y el impulso se amplifican sobre las paredes y el incremento relativo es mayor justo enfrente de la explosión ( $x=0$ ). A cierta distancia de las paredes, las sobrepresiones pico en líneas paralelas a las fachadas son coincidentes para las cuatro situaciones analizadas. Los impulsos se incrementan a medida que aumenta la distancia ( $x$ ) del explosivo. Este efecto se reduce a medida que se aumenta la distancia a las paredes y es mayor del lado de la pared 1, más cercana al explosivo. **Rose y Smith (2002)** también analizaron este efecto para cargas en el centro de la calle y demostraron que es más importante para calles más angostas y edificios más altos.

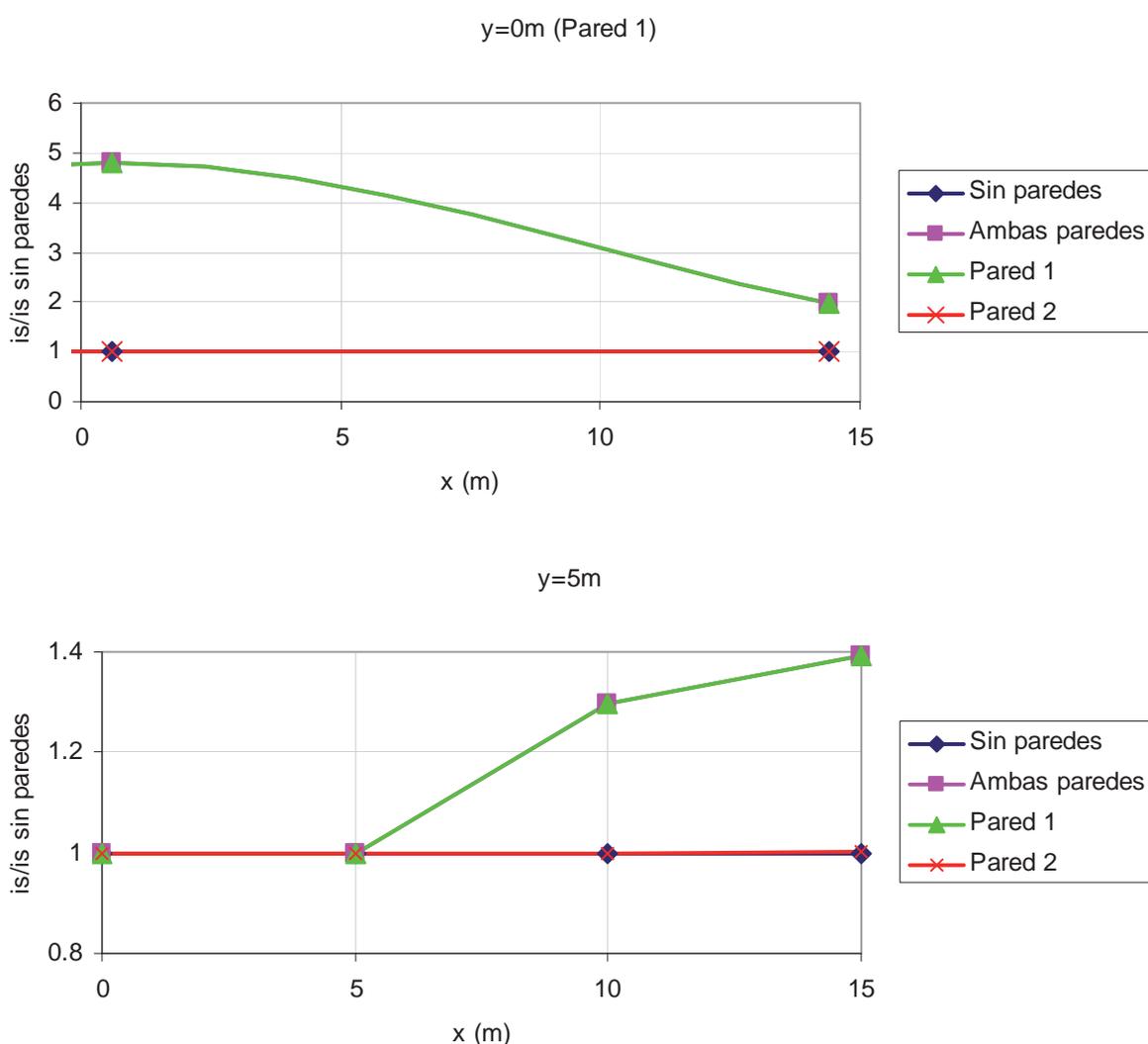


Figura 7. Variación del impulso a lo largo de la calle

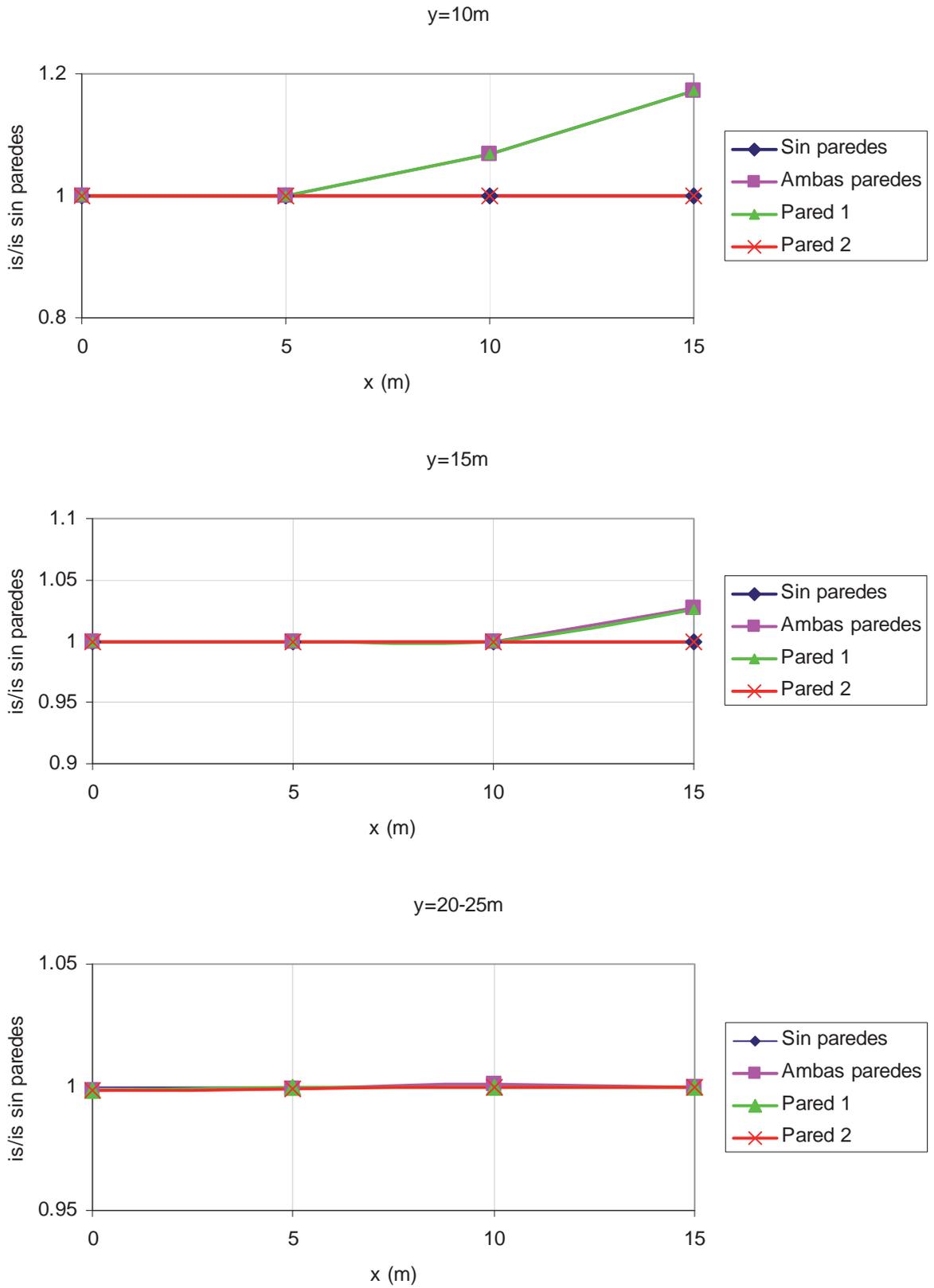


Figure 7. Variación del impulso a lo largo de la calle (Cont.)

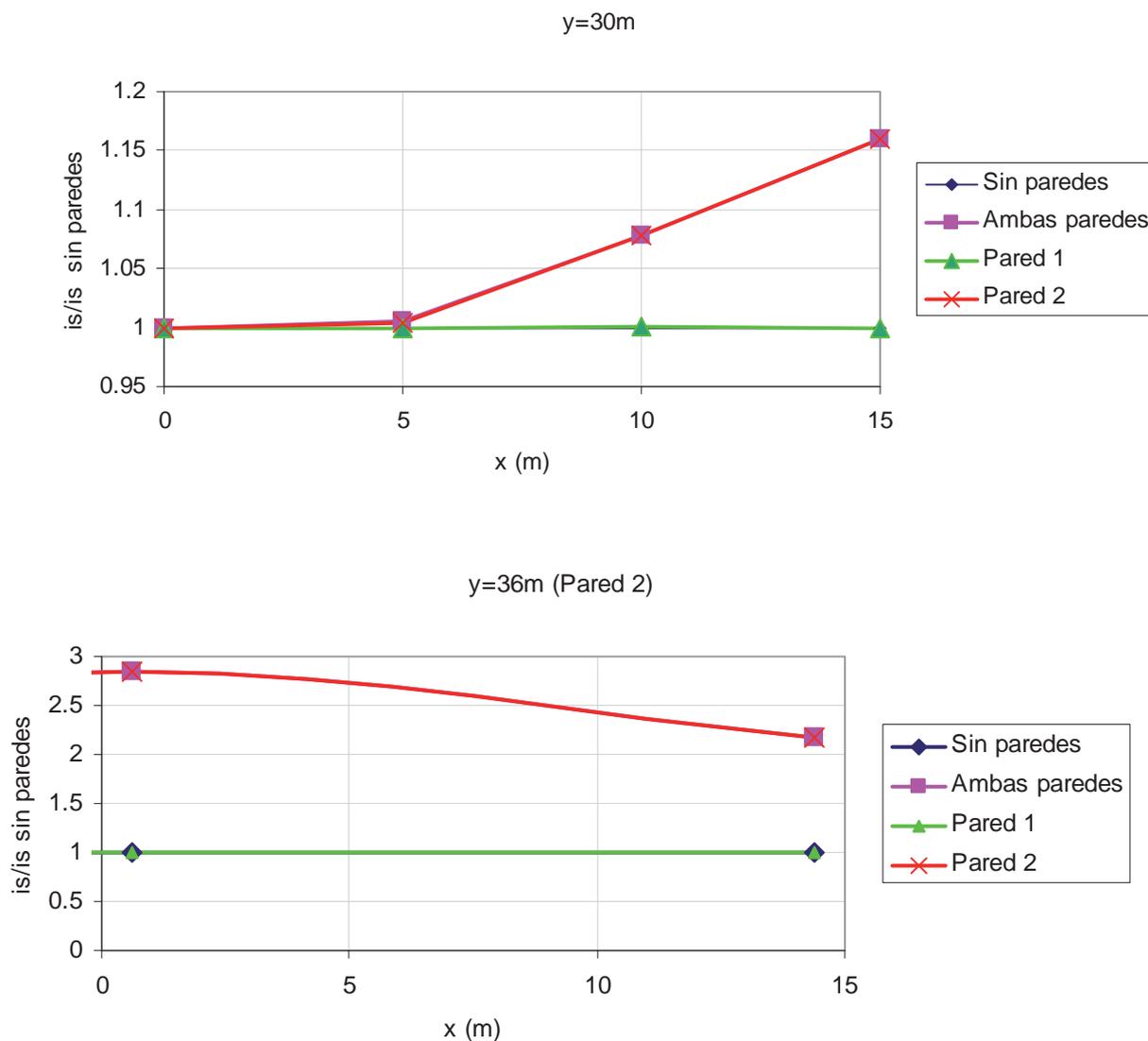


Figure 7. Variación del impulso a lo largo de la calle (Cont)

En este trabajo se demuestra que la influencia del efecto de las paredes depende además de la distancia del explosivo a las mismas. En la [Figura 8](#) se muestran los valores picos de sobrepresión e impulso obtenidos para la misma calle pero cuando la carga se ubica a 6m de la pared 1. En ese caso, cerca de la pared 2, la onda reflejada alcanza a la onda principal como se muestra en la [Figura 9](#). Como consecuencia de ello, se modifican los valores máximos de presión e impulso no solo en las paredes sino también en la zona cercana (ver [Figura 8](#)).

La [Figura 10](#) muestra la variación del impulso a través de la calle en  $x=0$  para distintas alturas de las paredes laterales y el caso de un pórtico lateral o paredes con aberturas. En todos los casos la carga está ubicada en  $x=0$   $y=10m$ , se consideran paredes de la misma altura a ambos lados de la calle y se refieren los valores de impulso a los correspondientes al caso sin paredes ( $H=0$ ). Se puede observar, en coincidencia con los resultados de [Rose y Smith \(2002\)](#), el incremento del impulso en la vecindad de las paredes cuando aumenta la altura de las mismas. Este incremento no se manifiesta en los valores de las sobrepresiones y sólo ocurre en una zona vecina a las paredes. Las dimensiones de esa zona dependen de la altura de las paredes. Cuando en lugar de paredes ciegas se consideran paredes con aberturas o

pórticos como en realidad son las fachadas de edificios, este incremento es menos importante.

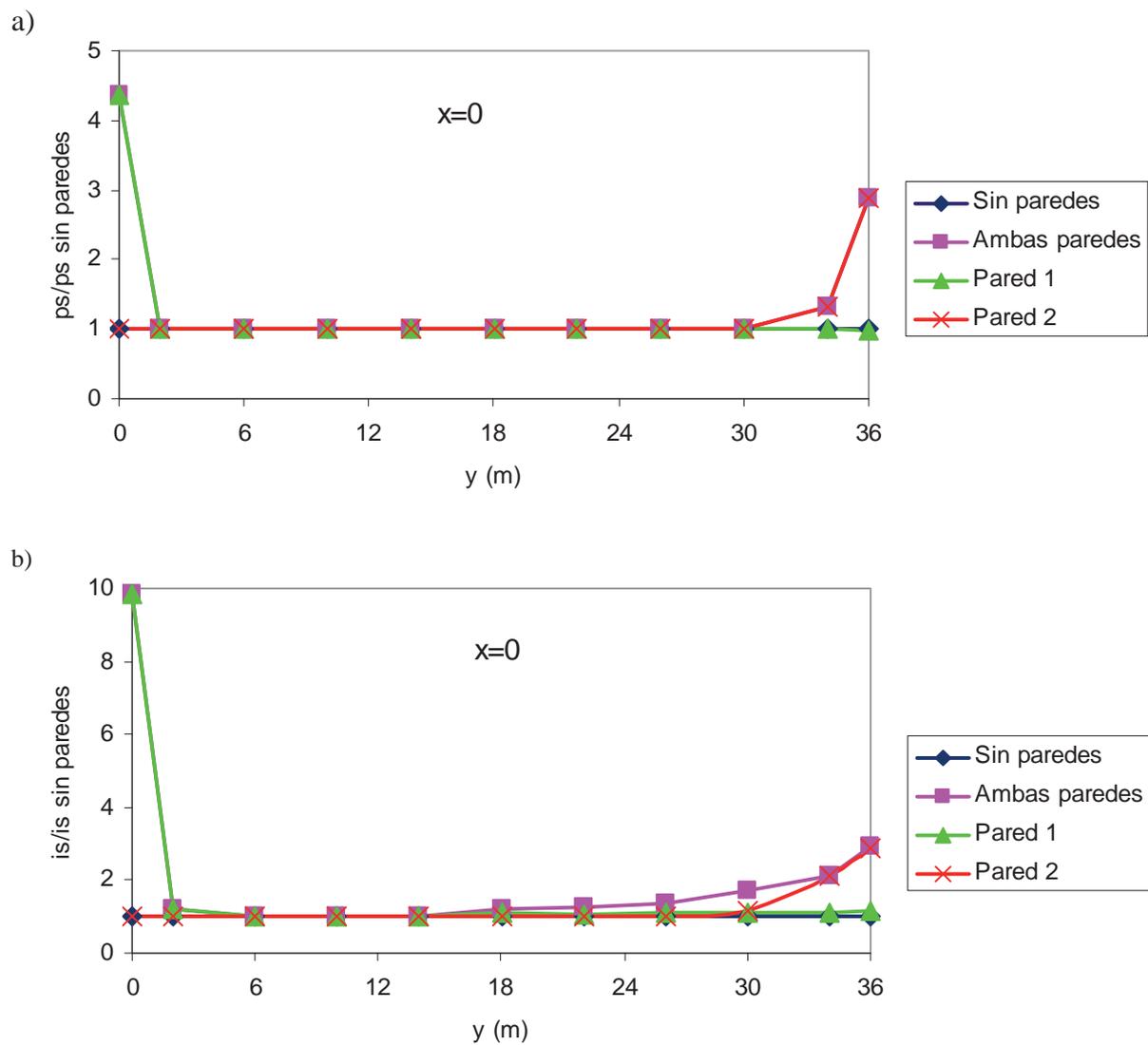


Figure 8. Carga ubicada en  $x=0$ ,  $y=6$ m. a) Variación de la sobrepresión máxima a través de la calle en  $x=0$ ; b) Variación del impulso máximo a través de la calle en  $x=0$

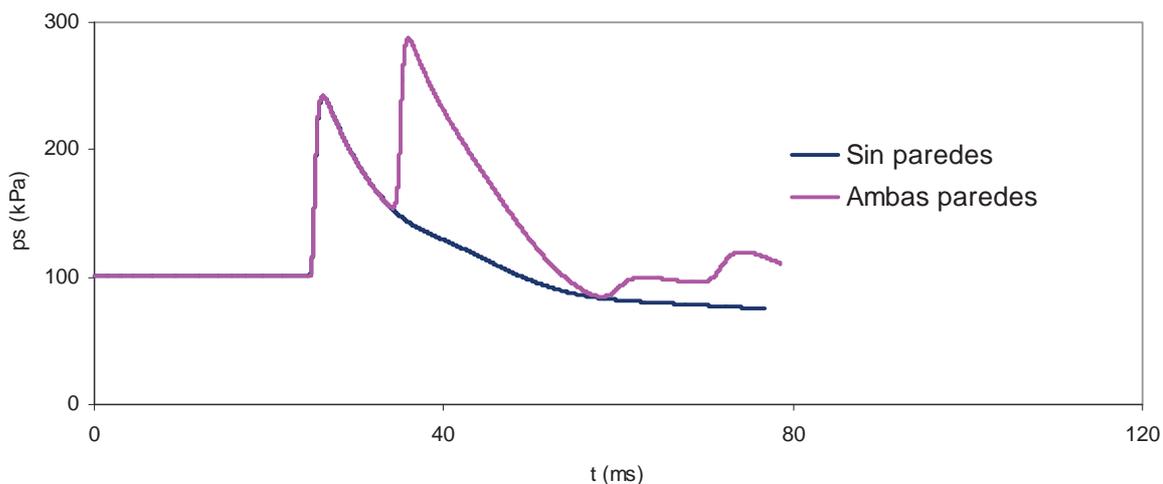


Figure 9. Historia de presión en el tiempo en  $x=0$ ,  $y=34m$  para carga ubicada en  $x=0$ ,  $y=6m$ .

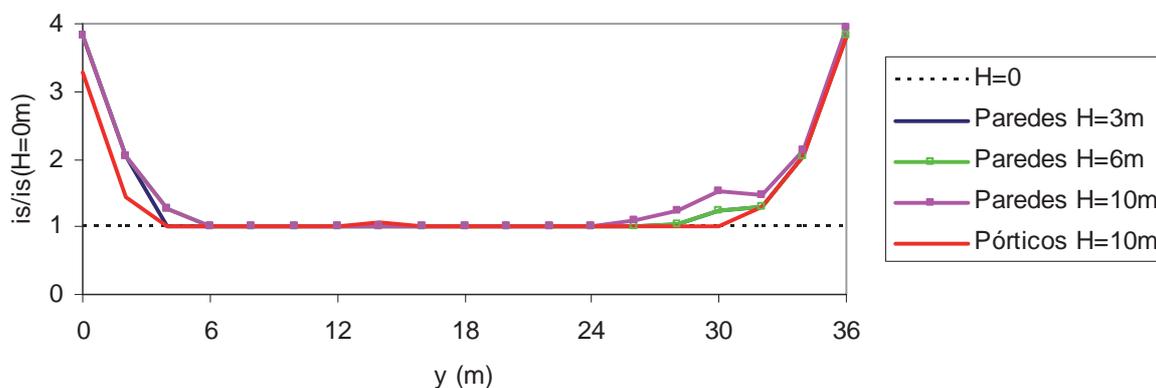


Figura 10. Variación del impulso a través de la calle en  $x=0$  para distintas alturas de las paredes laterales

## 5 EFECTO DE LA FORMA DE LA CARGA

En este punto se estudia el efecto de la forma de la carga explosiva en los parámetros de la onda de presión. Para ello se analizan cargas correspondientes a 2500 kg de TNT con diferentes relaciones de aspecto que se esquematizan en la [Figura 11](#), ubicadas todas a 80cm sobre el nivel del suelo.

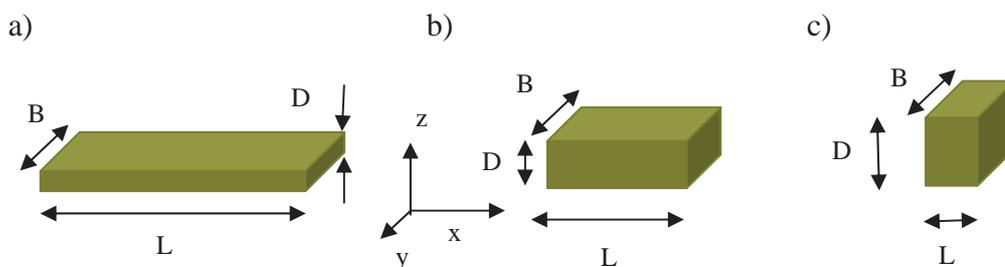


Figura 11. Distintas formas de la carga explosiva estudiadas. a)  $D=19.5$  cm ,  $L/B= 2.4$ , b)  $D=46.6cm$ ,  $L/B=1.0$ , c)  $D=93.2cm$ ,  $L/B=0.5$

Las Figuras 12 representan la variación del impulso a lo largo de la calle ( $x$ ) para distintas posiciones ( $y$ ) a través de la calle para las diferentes formas de explosivo simuladas. Todos los valores están referidos a los obtenidos en el caso (a). Se puede observar que, en general, el efecto de concentrar el explosivo es una disminución del impulso en la vecindad del explosivo y un incremento al alejarse del explosivo a lo largo de la calle. Estos efectos son más marcados en las cercanías del explosivo pero disminuyen hacia la pared más alejada. Estos resultados están en coincidencia con los resultados en Luccioni et al (2010) e indican que la misma cantidad de explosivos puesta en forma concentrada produciría un daño mucho mayor en la pared 1.

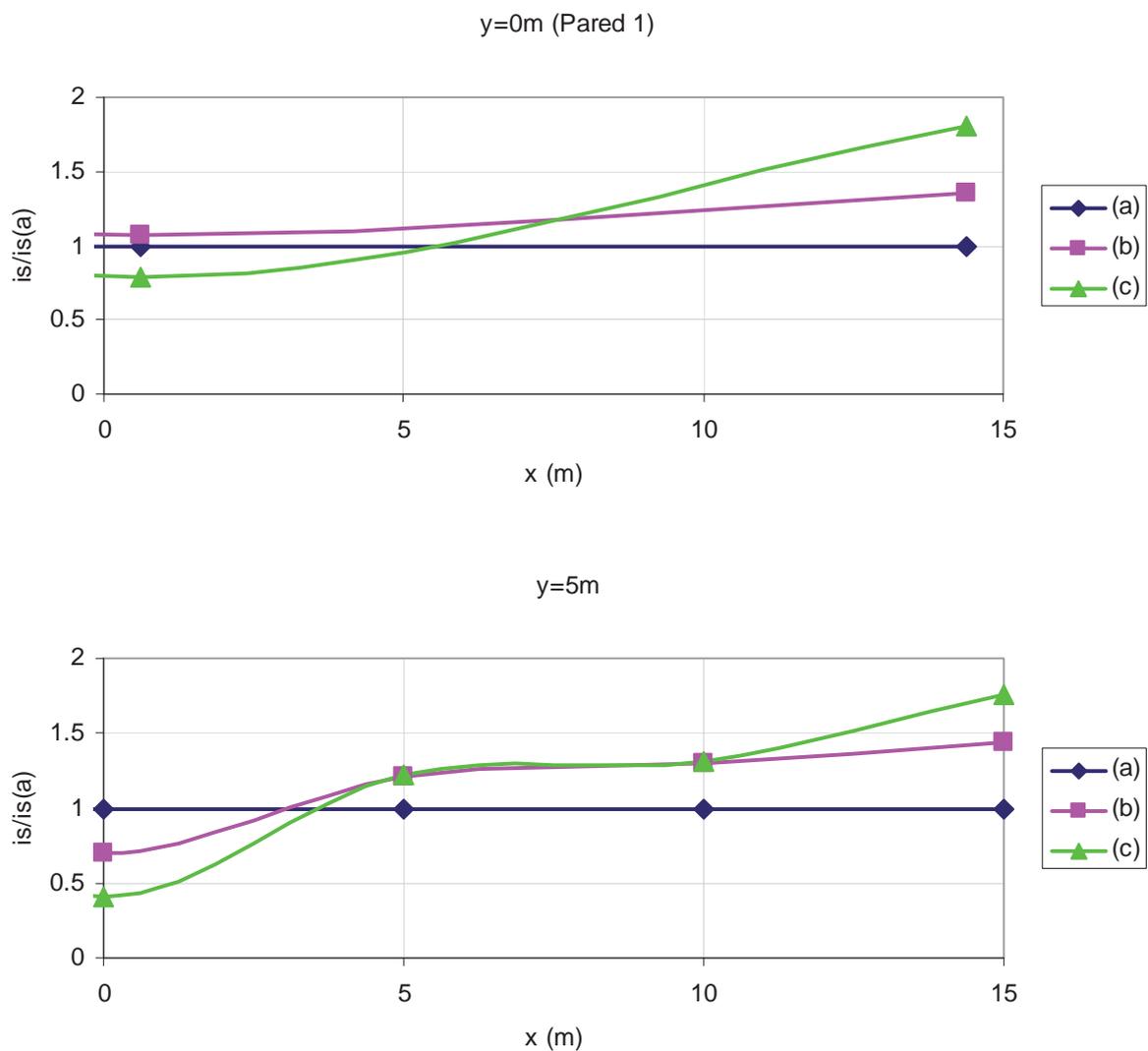


Figura 12. Efecto de la forma de la carga

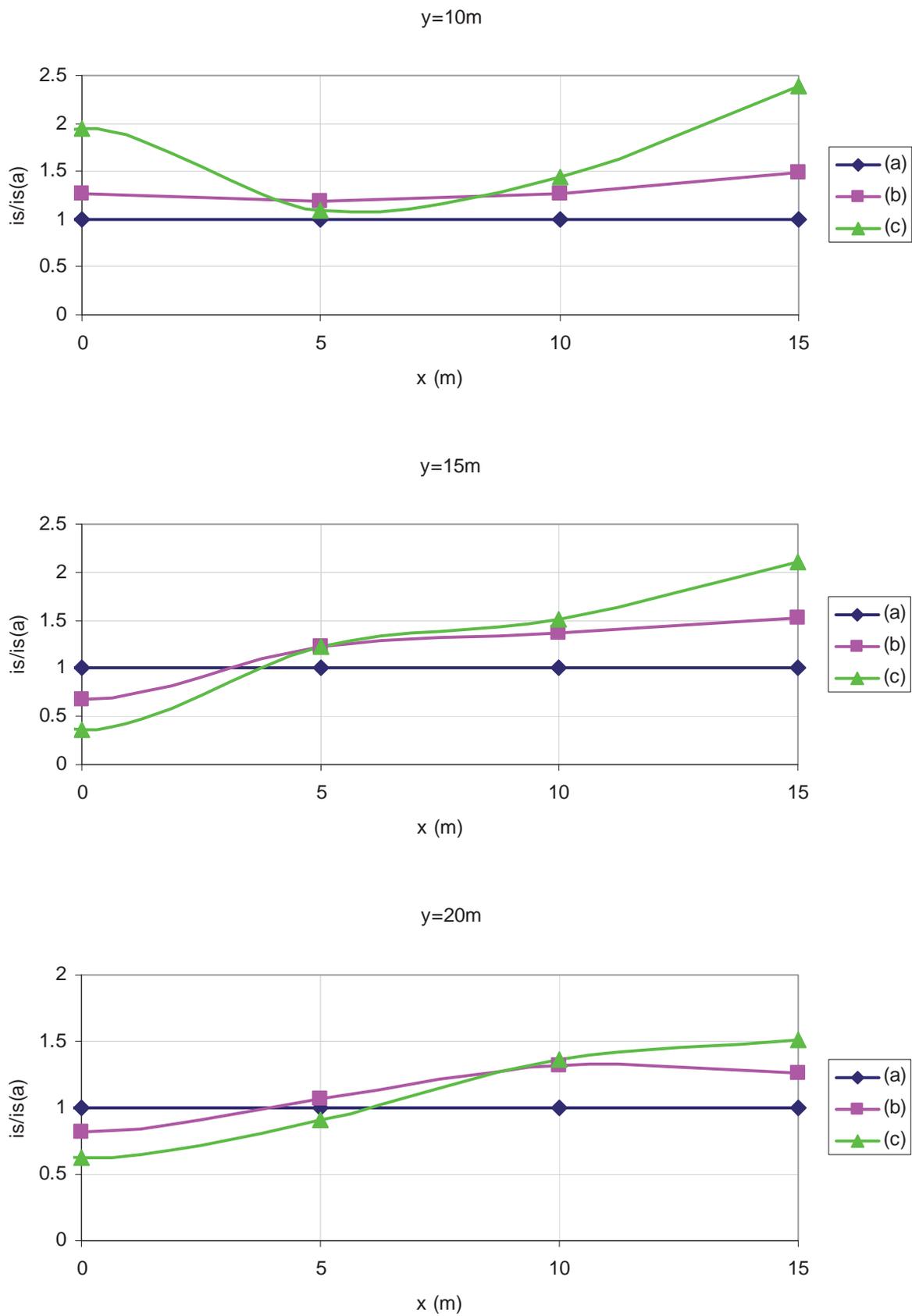


Figura 12. Efecto de la forma de la carga (Cont.)

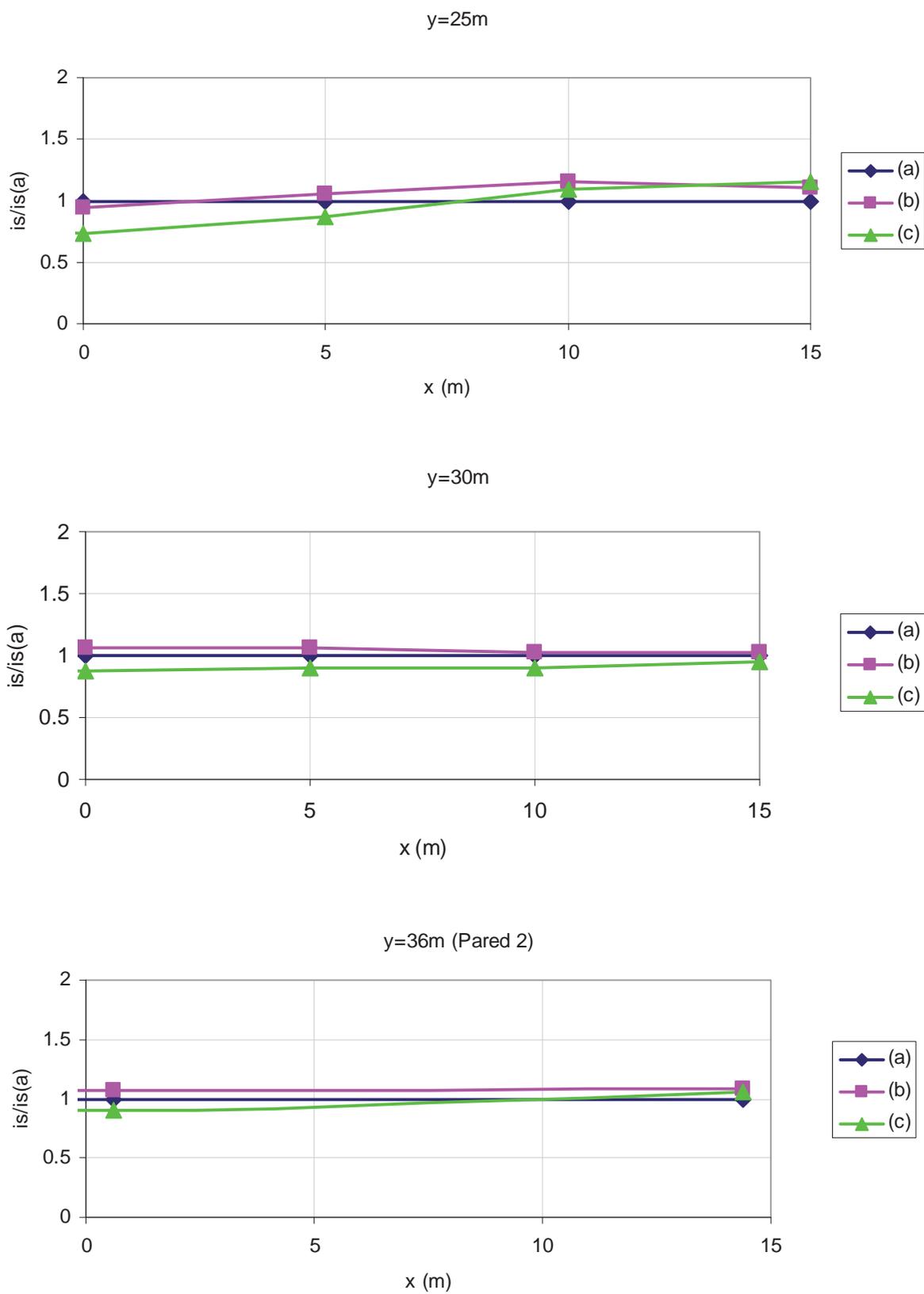


Figura 12. Efecto de la forma de la carga (Cont.)

## 6 EFECTO DE LA POSICIÓN DE LOS PUNTOS DE DETONACIÓN

Para analizar el efecto de la posición del punto de detonación en la onda de presión resultante se estudia el problema esquematizado en la [Figura 13](#) que corresponde a 1000kg de TNT a 1m del suelo con dos posiciones del punto de detonación: centrado (simétrico) o desplazado hacia la derecha (asimétrico). En la [Figura 14](#) se comparan las historias de presión en el tiempo obtenidas en ambos casos para puntos situados a distintas distancias del centro del explosivo. Puede observarse que al desplazar el punto de detonación hacia la derecha, se incrementa el valor del pico de sobrepresión hacia la izquierda y disminuye hacia la derecha. Este efecto es más importante cerca del explosivo pero se reduce a medida que aumenta la distancia al mismo. También se observa que cuando el punto de detonación se desplaza hacia la derecha, el frente de onda se desplaza más rápidamente hacia la izquierda que hacia la derecha.

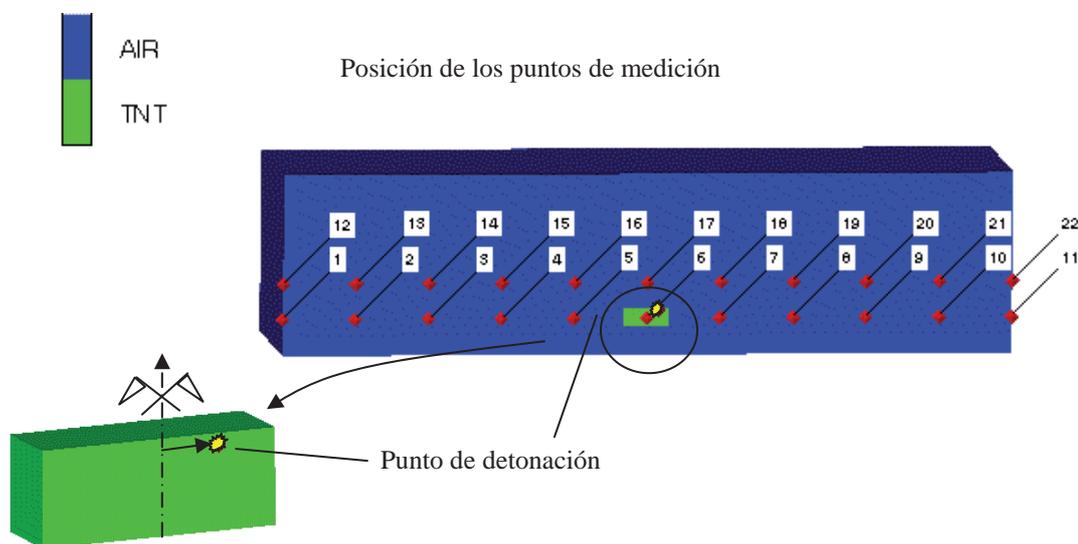
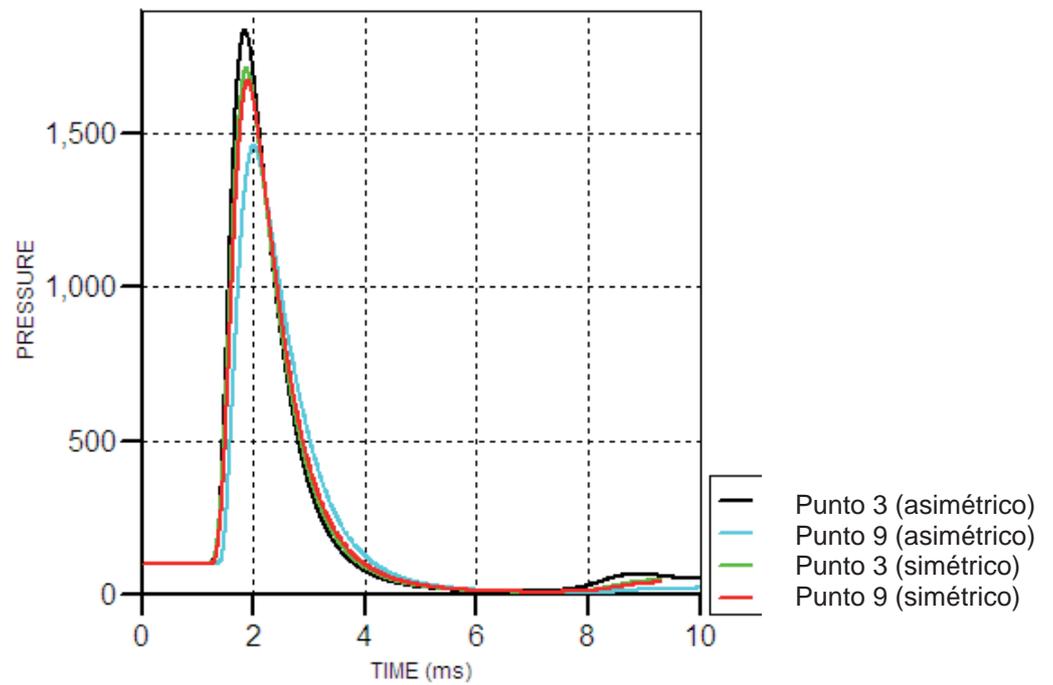


Figura 13. Modelo numérico para el estudio del efecto de la posición del punto de detonación

Adicionalmente se estudia el efecto de la posición del punto de detonación sobre los valores de presión e impulso en el caso de 2500kg de TNT estudiado en el apartado 4. Se considera un explosivo con la forma indicada en la [Figura 11a](#). Se comparan los valores de presión reflejada pico obtenidos sobre la pared 1 ubicada a 10m de la carga explosiva (Ver [Figura 15](#)). Se consideran dos situaciones: el punto de detonación en el centrado en el explosivo o desplazado hacia la izquierda. En este último caso se obtiene un valor de presión reflejada pico levemente superior en el punto 3 que en el punto 1 pero la diferencia es pequeña (5%).

a)



b)

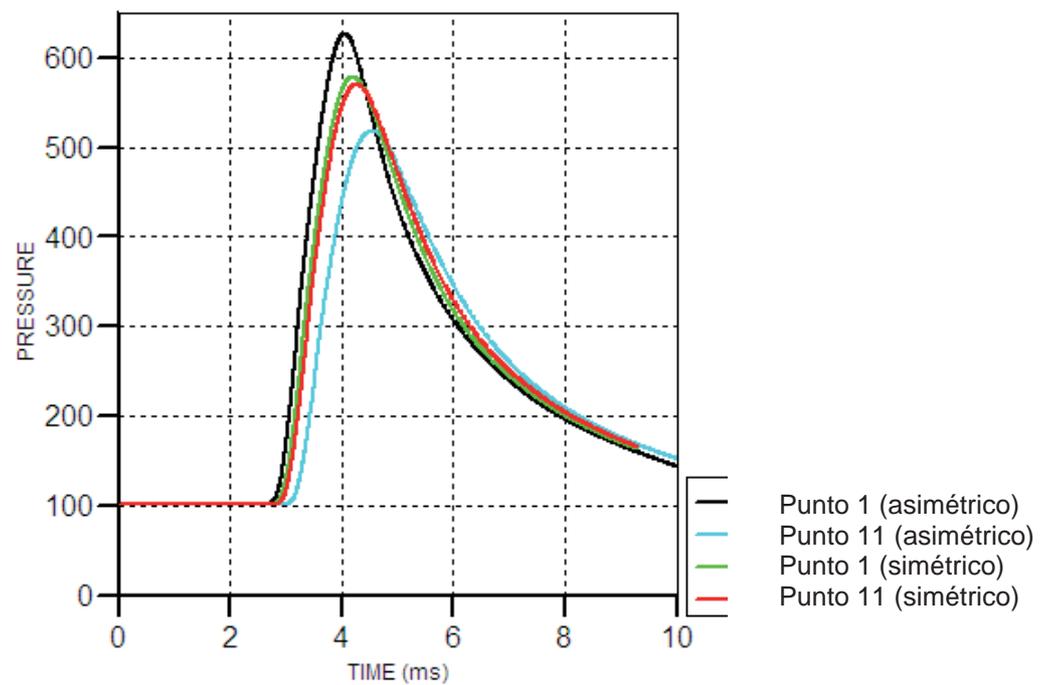


Figura 14. Historias de presión en el tiempo para diferentes ubicaciones del punto de detonación. a) Puntos situados a 6m de la carga explosiva; b) Puntos situados a 10m de la carga explosiva.

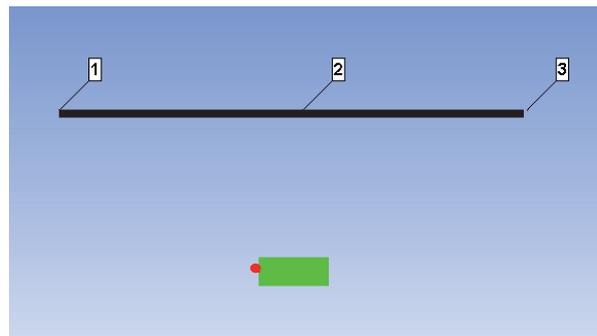


Figura 15. Modelo para el efecto del desplazamiento del punto de detonación sobre los valores de sobrepresión reflejada en una pared desplazada transversalmente

## 7 CONCLUSIONES

La solución de problemas de geometría compleja que involucran la propagación de una onda de presión generada por una explosión requiere la adecuada elección del modelo numérico para obtener resultados confiables a un costo computacional razonable. De este trabajo se pueden sacar algunas conclusiones útiles para la definición de los modelos numéricos en esos casos.

El modelo debe abarcar la zona de interés y sus alrededores evitando la cercanía de los bordes a la zona donde se tiene que medir la presión, fundamentalmente cuando se espera que la onda de presión incida en forma oblicua en los mismos generando reflexiones espurias. En muchos casos, cuando existen varias superficies de reflexión como ocurre en los ambientes urbanos, el problema puede ser descompuesto en distintos modelos para simular por partes el ambiente urbano pero, previamente, se debe verificar que la parte omitida en los modelos no tenga influencia en la parte del modelo en estudio. Los resultados de este trabajo muestran que la importancia del efecto de las fachadas opuestas en la onda de presión aumenta en las cercanías de la fachada de enfrente dependiendo de las distintas dimensiones geométricas del problema escaladas a la raíz cúbica de la masa de explosivo. Las variables más importantes son el ancho de la calle, la distancia del explosivo a una de las paredes y la altura y compacidad de las fachadas. En general, el efecto es más importante en calles más angostas, con fachadas más altas y más cerradas y cuando el explosivo se detona cerca de una fachada. El efecto es más importante a cierta distancia a lo largo de la calle. En todos los casos el efecto de las reflexiones se manifiesta más en los valores de impulso que en los valores de presión.

El tamaño escalado de la malla tiene una influencia muy importante en la precisión de los resultados en campo cercano siendo aconsejable trabajar con mallas de no más de  $0.02 \text{ m/kg}^{1/3}$  de tamaño escalado. Sin embargo, se pueden usar mallas más gruesas para comparar resultados correspondientes a distintas alternativas analizadas. En general, con mallas finas se obtiene muy buena precisión en los tiempos de llegada de la onda de presión y duración de la fase positiva. Los valores de impulso ajustan mejor los resultados experimentales que los valores de presión. Aún con mallas muy finas los resultados de sobrepresión reflejada en el campo cercano difieren más de los resultados experimentales que los valores de sobrepresión incidente. Para evaluar la importancia de las diferencias obtenidas en la simulación numérica a los efectos de simular daño es conveniente analizar la zona de los diagramas de iso-daño en la que se ubica el problema en estudio. En muchos problemas el daño queda definido por el impulso restando importancia a las diferencias obtenidas en la simulación numérica de los

valores de sobrepresión pico.

La forma de la carga y la ubicación de los puntos de detonación tienen influencia en los parámetros de la onda de presión en el campo cercano. En general, las cargas más concentradas tienen un efecto mayor a cierta distancia de la carga explosiva. Siempre que la forma y ubicación de los puntos de detonación lo permiten es preferible trabajar inicialmente con modelos en una o dos dimensiones y luego mapear los resultados en el modelo tridimensional ya que se pueden obtener resultados más precisos con menor costo computacional. Sin embargo, en caso de cargas con otras geometrías o ubicación de los puntos de detonación es importante evaluar el error introducido por esta simplificación.

Existen otros aspectos que juegan un papel importante en el efecto de la carga explosiva que no han sido presentados en este trabajo como la altura y el contenedor de la carga cuyo estudio no debe omitirse cuando se trata de estimar la cantidad y ubicación de una carga explosiva a partir de los daños ocasionados por la misma.

## REFERENCIAS

Alia, A. and Souli, M., High explosive simulation using multi-material formulations. *Applied Thermal Engineering*, 26:1032–1042, 2006.

Ambrosini, R. D., Luccioni, B., Jacinto A., Danesi R., Location and Mass of Explosive from Structural Damage. *Engineering Structures*, 27(2):167-176, 2005.

Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A., *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier; 1983.

Bull, J.W., Woodford, C.H., Camouflets and their effects on runway supports. *Computer and Structures*, 69(6):695–706, 1998.

Formby, S.A. and Wharton, R.K., Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at ground level. *Journal of Hazardous Materials*, 50, 183-198, 1996.

Hargather, M.J. and Settles, G.S., Laboratory-scale techniques for the measurement of a material response to an explosive blast. *International Journal of Impact Engineering*, 36:940–947, 2009.

Kinney, G.F. and Graham, K.J., *Explosive shocks in air*. 2nd ed. Springer Verlag; 1985.

Kwasniewski, L., Balcerzak, M., Wojciechowski, & J. A feasibility study on modeling blast loading using ALE formulation. *Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events (Proceedings)*:127-132, 2010.

Lee, E.L. and Tarver, C.M., Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Physics of Fluids*, 23(12):2362-2372, 2008.

Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R., Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures* 26:63–71, 2004a.

Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R., Colapso estructural bajo cargas explosivas. *Rev. Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 1(1):1806-3985, 2004b.

Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R., Predicting the location and size of explosive device detonated in an urban environment using evidence from building damage. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings*, 158(SB1):1-12, 2005.

Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R., Blast load assessment using Hydrocodes. *Engineering Structures*, 28(12):1736-1744, 2006.

Luccioni, B.M., Ambrosini, R.D., Numerical assessment of blast effects scaling procedures. *Computational Mechanics*, 29:1161-1179, 2010.

Luccioni, B., Ambrosini, D., Steeve, C. K. Y., Nurick, G.N., Effects of large and spread

explosives loads. *International Journal of Protective Structures*, 1(3), 319-344, 2010.

Remennikov, A., Rose, T., Predicting the effectiveness of blast wall barriers using neural networks. *International Journal of Impact Engineering*, 34(12):1907–1923, 2007.

Rose, T.A., Smith, P.D., Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses, *International Journal of Impact Engineering*, 27:359–376, 2002.

Schenker, A., Anteby, I., Gal, E., Kivity, Y., Nizri, E., Sadot, O., Michaelis, R. Levintant, O., Ben-Dor, G., Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 35:184–198, 2008.

Smith, P.D., Hetherington, J.G., *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth-Heinemann Ltd; 1994.

Sorensen, A., McGill, W., Review. What to look for in the aftermath of an explosion? A review of blast scene damage observables. *Engineering Failure Analysis*, 18:836–845, 2011.

Tanapornraweekit, G., Haritos, N., Mendis, P., Ngo, T., Modelling of a Reinforced Concrete Panel Subjected to Blast Load by Explicit Non-linear FE Code. *The Australian Earthquake Engineering Society*, AEES2007, 2007.

Zhou, X.Q. Hao, H., Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*, 35:363–375, 2008.

Nombre de archivo: Luccioni & Ambrosini (MECOM 2012).doc  
Directorio: C:\Enterradas 2008\MECOM 2012  
Plantilla: C:\Documents and Settings\nestor\Escritorio\enief\enief2004.dot  
Título: INSTRUCTIONS TO PREPARE A PAPER ACCORDING TO THE  
AMCA-STYLE  
Asunto: ENIEF 2008 - San Luis  
Autor: Nestor Calvo, Martin Pucheta, Rodrigo Paz and Mario Storti  
Palabras clave: Instructions, AMCA, Argentina, Computational Mechanics,  
Proceedings  
Comentarios:  
Fecha de creación: 7/16/2012 12:02:00 PM  
Cambio número: 50  
Guardado el: 8/15/2012 4:01:00 PM  
Guardado por: Toshiba  
Tiempo de edición: 7,784 minutos  
Impreso el: 8/15/2012 4:10:00 PM  
Última impresión completa  
Número de páginas: 25  
Número de palabras: 5,795 (aprox.)  
Número de caracteres: 33,035 (aprox.)