

PROPAGACIÓN DE ONDAS DE PRESION GENERADAS POR EXPLOSIONES EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

Daniel Ambrosini*, Bibiana Luccioni[†], Abel Jacinto[†], Rodolfo Danesi[†].

* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo
Centro Universitario - Parque Gral. San Martín - (5500) Mendoza. Fax 54 0261 4380120
e-mail: dambrosini@uncu.edu.ar, web page: <http://fing.uncu.edu.ar/>

[†] Instituto de Estructuras
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán
Av. Roca 1800, 4000 Tucumán, Argentina. TE: 54-0381-4364087 FAX: 0381 4364087
e-mail: labest@herrera.unt.edu.ar, web page: <http://herrera.unt.edu.ar/iest>

Palabras clave: Acciones impulsivas, presiones, impulsos, estructuras, hidrocódigo.

Resumen. *La protección de estructuras frente a explosiones exige la determinación, lo más precisa y confiable posible de la carga debida a explosiones sobre los componentes estructurales teniendo en cuenta la complejidad de la geometría del edificio y del ambiente circundante. Efectos importantes tales como las múltiples reflexiones de la onda explosiva sólo pueden ser modelados mediante técnicas numéricas complejas de dinámica de fluidos. En este trabajo se presenta la simulación del proceso de detonación del explosivo y la propagación de la onda de presión en un ambiente urbano complejo mediante la utilización de un hidrocódigo. Se analizan y comparan los resultados obtenidos con los que surgen de la aplicación de fórmulas empíricas. Adicionalmente, se obtiene la distribución de presiones e impulso en las fachadas de los edificios para distintas alternativas simuladas. Se analiza el efecto de la magnitud y ubicación de la carga explosiva.*

1 INTRODUCCIÓN

Las cargas explosivas han concitado considerable atención en los últimos años, debido a diferentes hechos accidentales o intencionales relacionados con estructuras importantes ocurridos en todo el mundo. La actividad relacionada con ataques terroristas se ha incrementado y lamentablemente la tendencia actual sugiere que será aún mayor en el futuro. Este trabajo se refiere a la acción dinámica producida por la detonación de materiales explosivos en ambientes urbanos, situación esperable en muchos ataques terroristas. En tal sentido, resulta útil, no sólo para el diseño de estructuras para resistir este tipo de acciones sino también para la estimación de la carga y ubicación del explosivo cuando la explosión ya se ha producido.

Una herramienta importante para lograr este último objetivo es la evidencia de un cráter. Sin embargo, existen muchas situaciones en las que el cráter no se forma o desaparece bajo los escombros. Por otra parte, pueden encontrarse en la literatura^{1,2} algunas expresiones empíricas para la determinación de las dimensiones del cráter pero, de acuerdo a Kinney and Graham¹, los resultados pueden tener un coeficiente de variación del 30%. En estos casos, la evaluación de las presiones e impulsos generados por la detonación a través de un análisis computacional y la posterior comparación con los daños reales registrados en el ambiente urbano constituye una alternativa atractiva para la obtención de la ubicación y masa de explosivo utilizada. Es posible simular distintas alternativas correspondientes a diferentes ubicaciones del foco de la explosión y diferentes masas de explosivo y obtener los daños producidos por las mismas utilizando curvas de isodaño. Finalmente, la comparación de los daños simulados con los reales permite descartar la mayoría de las alternativas simuladas.

El objetivo de este trabajo es la obtención de presiones e impulsos en las fachadas de los edificios producidos por la detonación de una carga explosiva en un ambiente urbano teniendo en cuenta las múltiples reflexiones de la onda de presión producidas en el suelo y los diferentes edificios.

Históricamente el análisis de explosiones se ha realizado utilizando predominantemente métodos analíticos simplificados o ha requerido el empleo de supercomputadoras para simulaciones numéricas detalladas. En las últimas décadas, con el rápido desarrollo del hardware computacional, está siendo posible realizar simulaciones numéricas detalladas en computadoras personales, lo que ha incrementado notablemente la capacidad de estos métodos. Por otro lado, los nuevos desarrollos en hidrocódigos integrados, completan el conjunto de herramientas necesarias para poder llevar a cabo satisfactoriamente el análisis numérico.

Efectos importantes como las múltiples reflexiones de la onda de presión generada por la explosión, el efecto “mach”, rarefacciones y la fase negativa de la onda de presión pueden ser adecuadamente reproducidos mediante programas de la dinámica de fluidos computacional. Las técnicas analíticas simplificadas y semiempíricas generalmente ignoran estos fenómenos. En este trabajo se utiliza un hidrocódigo basado en técnicas de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos para resolver una gran variedad de problemas no lineales de la dinámica de sólidos, fluidos y gases.

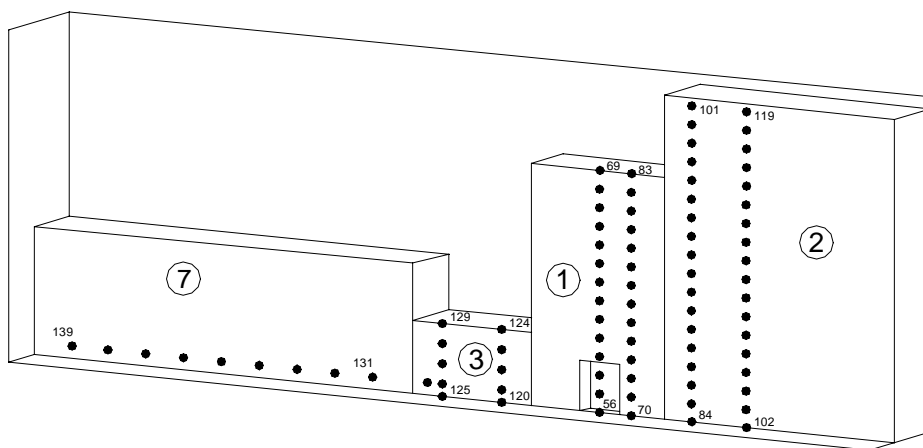
La respuesta de una estructura a cargas explosivas depende de la magnitud de la misma definida en términos de sobrepresión pico e impulso, y de la inercia y resistencia de la estructura conjuntamente con su período natural de vibración.

Fairlie³, Hayhurst and Fairlie⁴ y Birnbaum et al⁵ aplican las técnicas computacionales usadas en este trabajo a otras situaciones y objetivos.

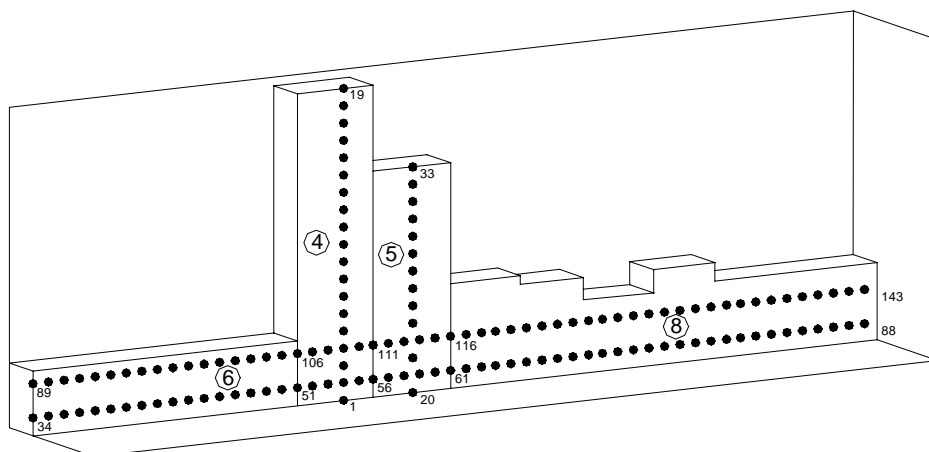
2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ANALIZADO

2.1 Escenario

Se analiza en este trabajo un ambiente urbano complejo como el representado en la Figura 1, que corresponde a los edificios de ambas veredas de una misma cuadra.



a) Vereda del edificio blanco del ataque



b) Vereda de enfrente del edificio blanco del ataque

Figura 1: Ambiente urbano considerado y puntos de control

Este escenario corresponde a la cuadra de Pasteur al 600 de la ciudad de Buenos Aires. El blanco del ataque es el edificio denotado como 1 en la Figura 1 que corresponde al edificio de la Asociación Mutual Israelita Argentina que sufrió un atentado en Julio de 1994.

2.2 Alternativas analizadas

Masa de explosivo: Con el objetivo de obtener resultados comparables, la masa de explosivo es definida por Kg de TNT. Las masas correspondientes a otros tipos de explosivo pueden obtenerse con el concepto de equivalencia de TNT⁶. Se utilizaron 200, 300, 400 y 500 Kg de TNT porque dichas cargas están en el rango medio usado en ataques terroristas. El rango de masas de explosivo usado en ataques terroristas es discutido en algunos trabajos^{7,8} y es fuertemente dependiente de la forma de transporte del explosivo.

Ubicaciones del foco: Se consideraron siete localizaciones posibles del foco de acuerdo a lo indicado en figura 2 y tabla 1. Las mismas fueron elegidas alrededor del frente del edificio de la AMIA. Las localizaciones posibles pueden ser inferidas luego de una inspección visual de los daños.

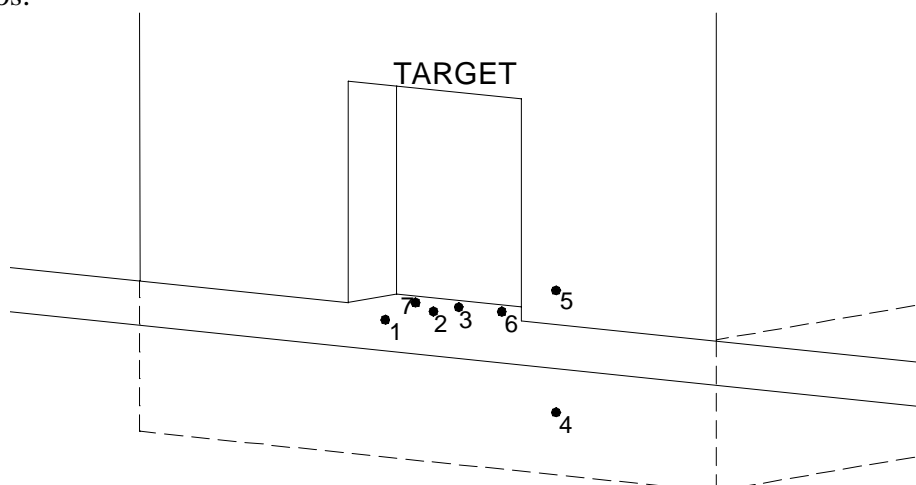


Figura 2. Ubicaciones posibles del foco de la explosión

Tabla 1. Ubicaciones posibles del foco de la explosión

Ubicaciones del foco analizadas	Descripción
1	2m fuera de la línea de edificación. Eje central
2	Línea de edificación. Eje central
3	1m dentro del Hall. Eje central
4	Subsuelo. Eje central
5	5m dentro del edificio de la AMIA. Eje central
6	1m dentro del Hall. 1.25m hacia la izquierda
7	1m dentro del Hall. 1.25m hacia la derecha

3 GENERACIÓN DE LA CARGA EXPLOSIVA

3.1 Consideraciones iniciales

Si una onda explosiva inicialmente esférica encuentra una serie de obstáculos, se crea un flujo tridimensional complejo generado por las sucesivas reflexiones de la onda. En este caso puede plantearse un modelo tridimensional desde el comienzo del análisis, lo que trae aparejado un gran costo computacional ya que es excesivo el número de “elementos” requeridos para tener una precisión aceptable en las fases iniciales de la expansión de la onda explosiva

Alternativamente, pueden usarse condiciones de simetría para representar la expansión inicial con un modelo unidimensional (1D). De esta forma se produce una gran reducción de “elementos” cuando se lo compara con un modelo tridimensional. Cuando la onda esférica comienza a interactuar con obstáculos, el flujo se hace multidimensional. Sin embargo, antes de este momento, la solución unidimensional puede ser impuesta o remapeada en una región específica del modelo multidimensional. El cálculo 3D puede comenzar a partir de ese punto. Este procedimiento no sólo reduce el tiempo requerido para el cálculo sino que incrementa la precisión debido a la resolución fina de la malla 1D en la fase inicial de detonación y expansión

3.2 Detonación y expansión inicial

De acuerdo a lo mencionado en el punto anterior, el problema en estudio es dividido en dos etapas: a) Detonación y expansión inicial y b) Propagación de la onda explosiva.

La detonación y expansión inicial de la esfera de explosivo son analizadas en 1D mediante un modelo esféricamente simétrico de 1 m de radio y con una ecuación de estado JWL. Luego de un tiempo de ocurrida la detonación y cuando la mayor parte del sólido se ha transformado en gas, el modelo del material explosivo y por ende la ecuación de estado es modificado para evitar errores numéricos. El análisis unidimensional continua hasta el instante anterior a que la onda explosiva incida en una superficie rígida. En este momento se genera un archivo de remapeo, el cual es importado posteriormente en el modelo tridimensional, el cual permite tener en cuenta las reflexiones producidas en superficies rígidas.

La malla utilizada en el modelo 1D es presentada en Figura 3 donde se puede observar que hay 20 “elementos” en la masa de explosivo, que es el doble del mínimo recomendado en la documentación del programa para evitar problemas numéricos. Como modelo de material se utilizó el TNT. La densidad del explosivo conduce a un radio de 352.9 mm para una carga esférica de 300 kg de TNT.

Para ilustrar esta etapa de expansión inicial se llevó a cabo un remapeo en 2D y en Figuras 4 y 5 se muestran, respectivamente, el modelo y el campo de velocidades generado luego de 0.07 ms. Es importante destacar que, en el análisis final se hizo un remapeo directo del modelo 1D al modelo 3D.

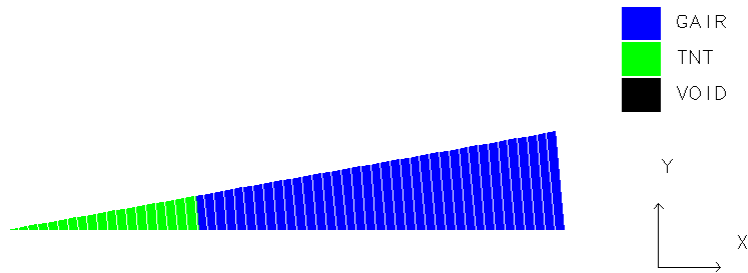


Figura 3: Modelo unidimensional

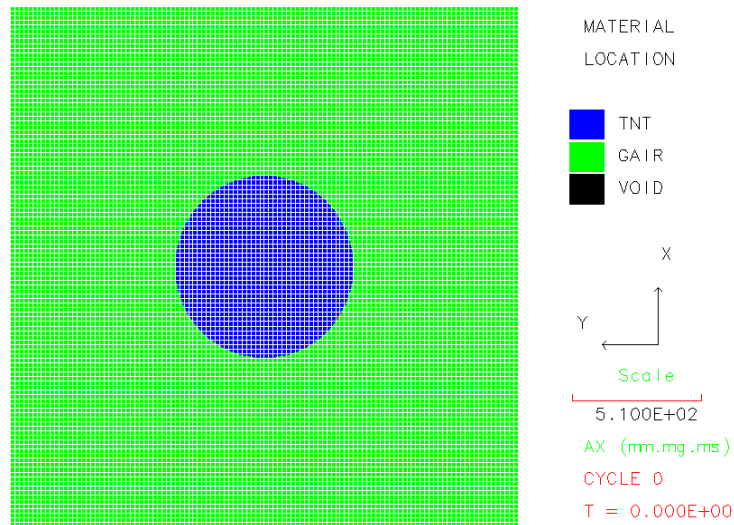


Figura 4: Modelo bidimensional

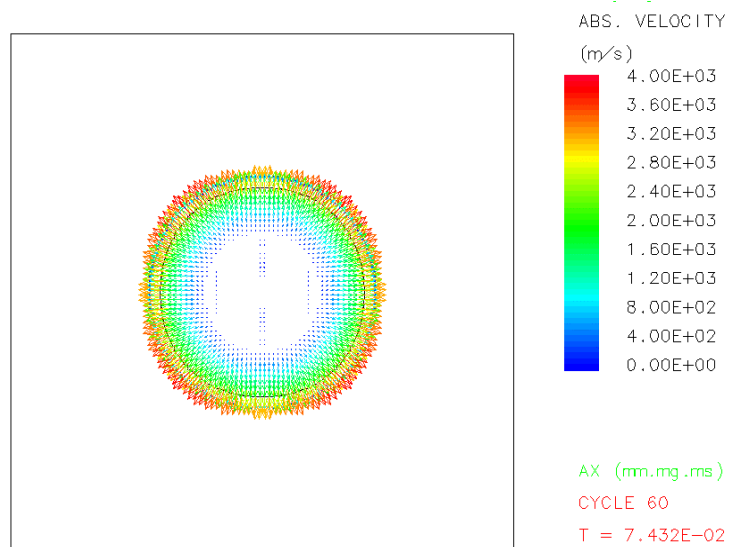


Figura 5. Campo de velocidades. 0.07 ms

4 ESCENARIO COMPUTACIONAL

4.1 Modelos analizados

Considerando el enorme número de grados de libertad involucrados en el análisis del ambiente urbano de una cuadra presentado en Figura 1, el modelo es subdividido en dos: Uno correspondiente a la vereda donde está ubicado el edificio blanco del ataque y otro correspondiente a la vereda de enfrente. Los modelos son llamados Modelo 1 y 2 respectivamente y son presentados en la Figuras 6 y 7. La cantidad de “elementos” es 380.000 y 615.000 respectivamente. Las implicancias teórico-numéricas de esta subdivisión serán discutidas en la sección siguiente.

Luego de considerar diferentes alternativas, se adoptó como medida de los elementos cúbicos 0.5 m, la cual es una medida que compatibiliza la precisión de la solución con el costo computacional. El modelo es resuelto mediante una formulación Euler, en la cual los nodos están fijos y el material (aire) fluye a través de los elementos. Se utilizó el algoritmo FCT (Flux Corrected Transport) con el objetivo de mejorar la precisión y eficiencia. Los edificios son definidos como regiones “unused” y se considera que se comportan como superficies rígidas. Se definen los contornos restantes del modelo con una condición de borde “flow-out”, el cual es un borde transmisor que permite “continuar” la onda de presión por dicho contorno sin reflejarse.

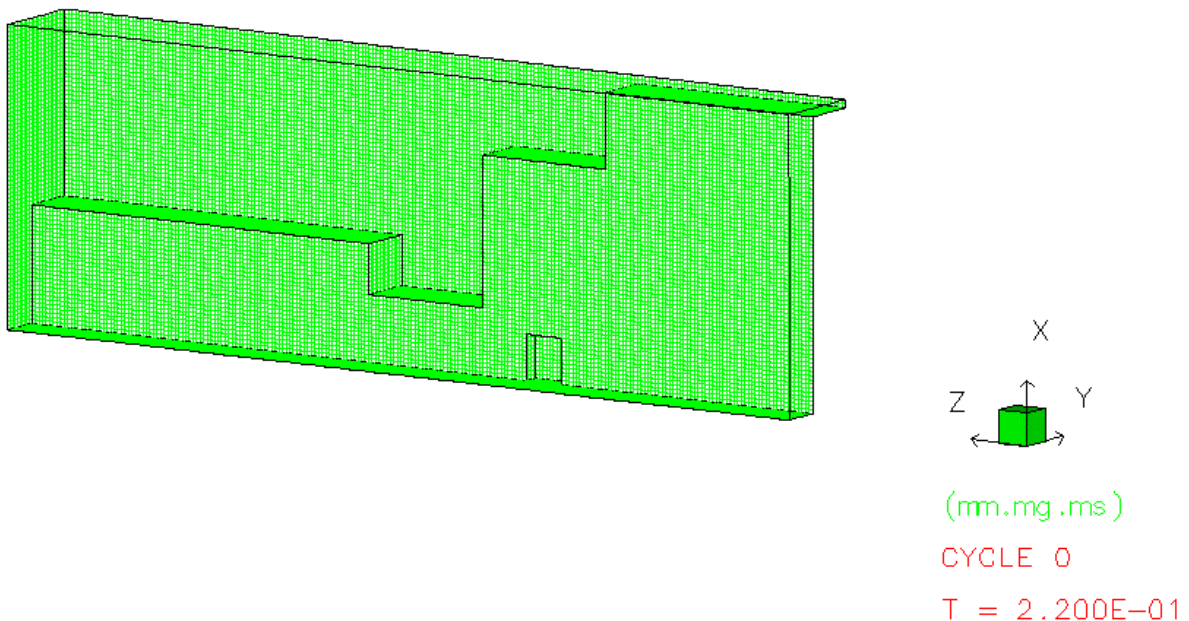


Figura 6. Modelo 1. Vereda del edificio blanco del ataque

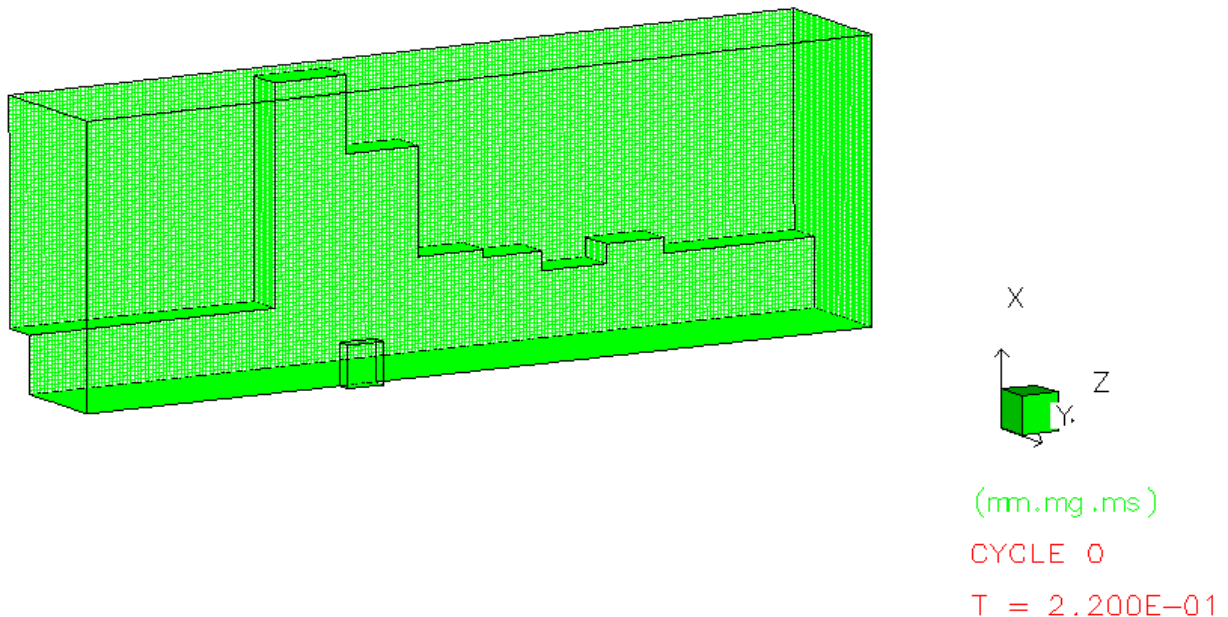


Figura 7. Modelo 2. Vereda de enfrente del edificio blanco del ataque

4.2 Puntos de control

Con el objetivo de analizar las presiones e impulsos generados en las fachadas de los edificios se definieron varios puntos de control en los modelos, indicados en Figura 1. Esos puntos están distribuidos en altura en los edificios más altos como así también a lo largo de la cuadra. En estos puntos se almacenan todas las variables de interés para el análisis.

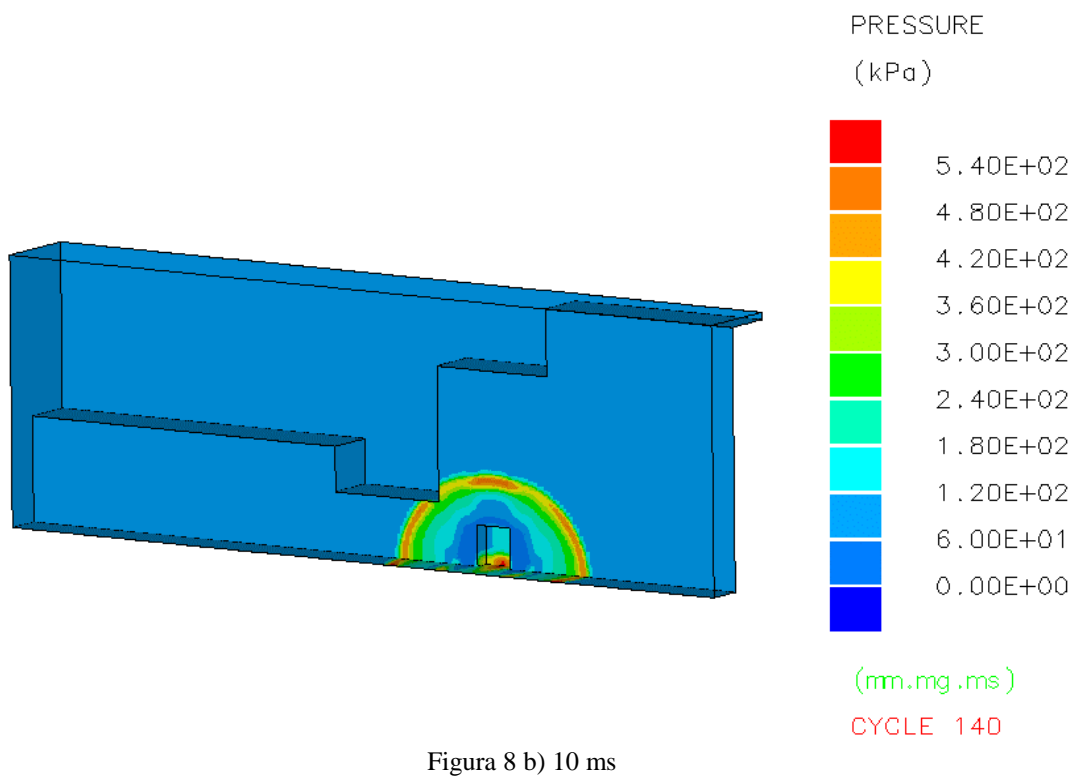
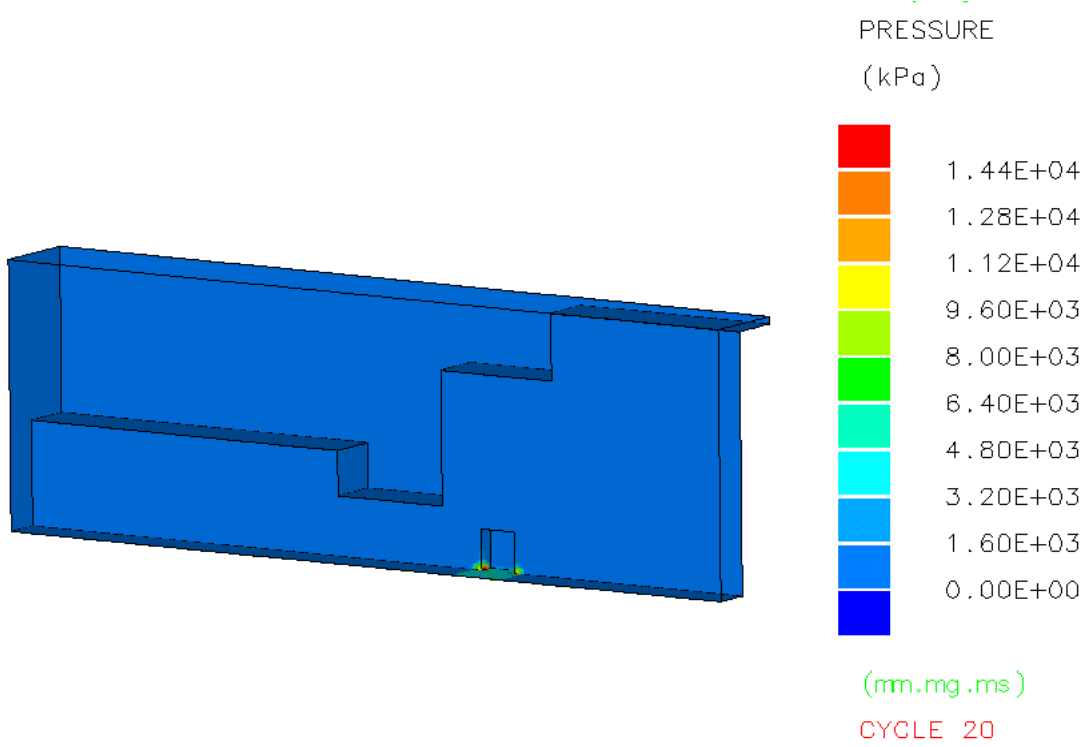
En la vereda del edificio blanco del ataque se localizaron un total de 139 puntos de control (Modelo 1) y 143 puntos en la vereda de enfrente (Modelo 2).

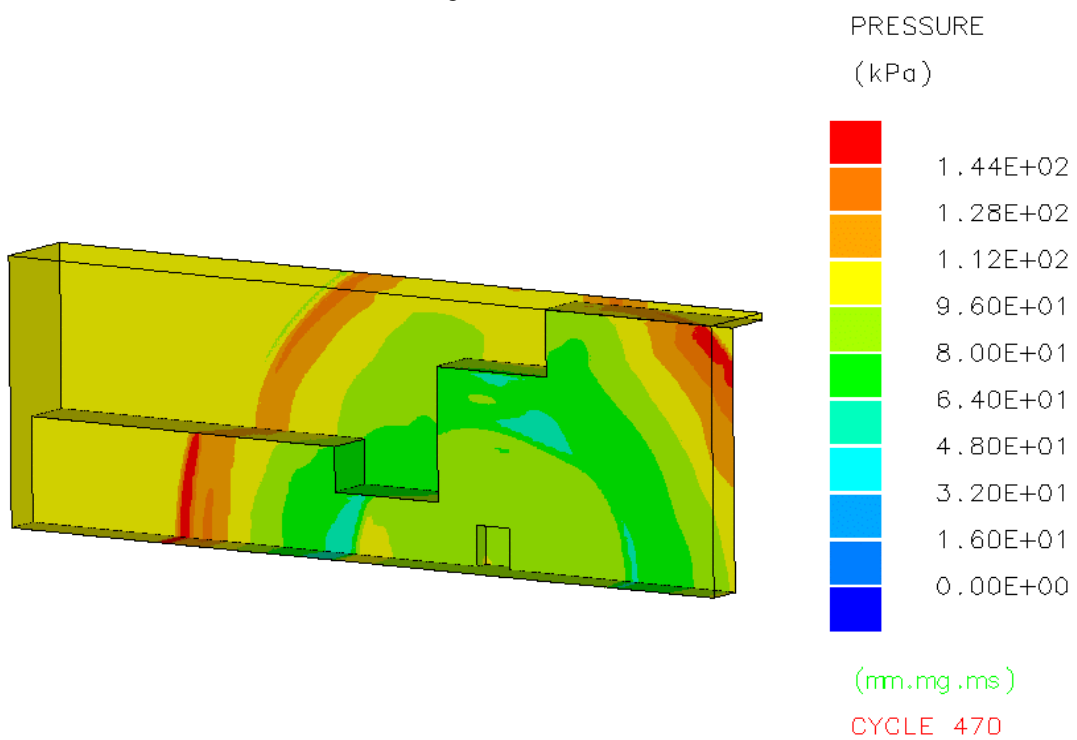
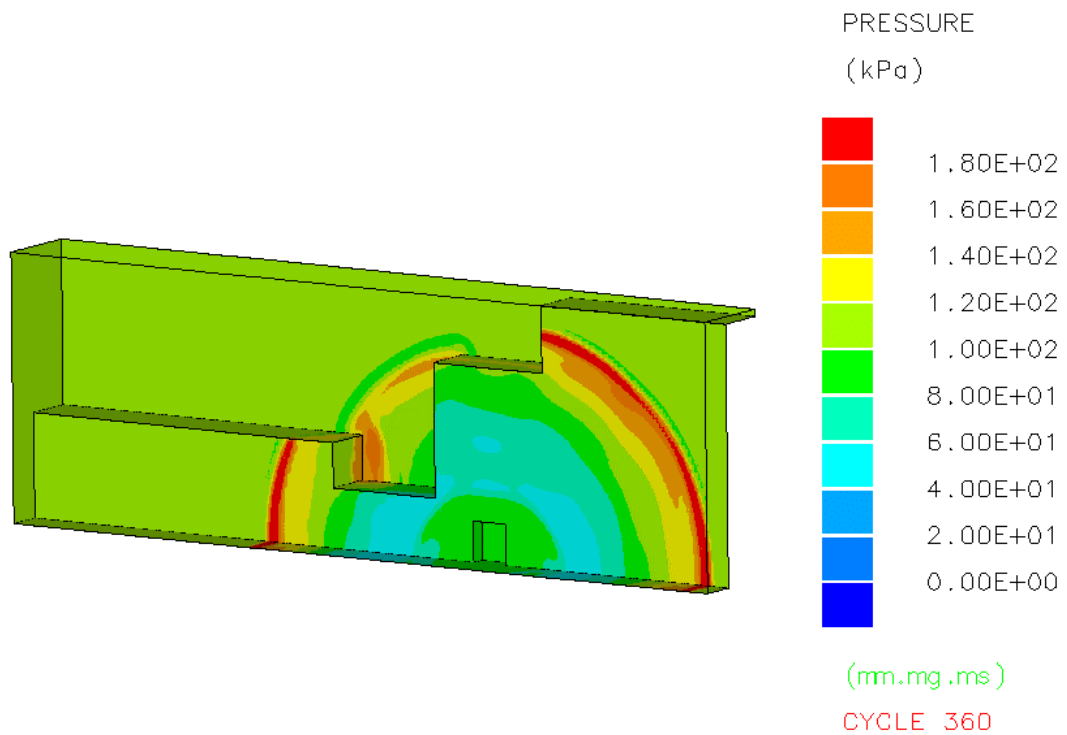
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

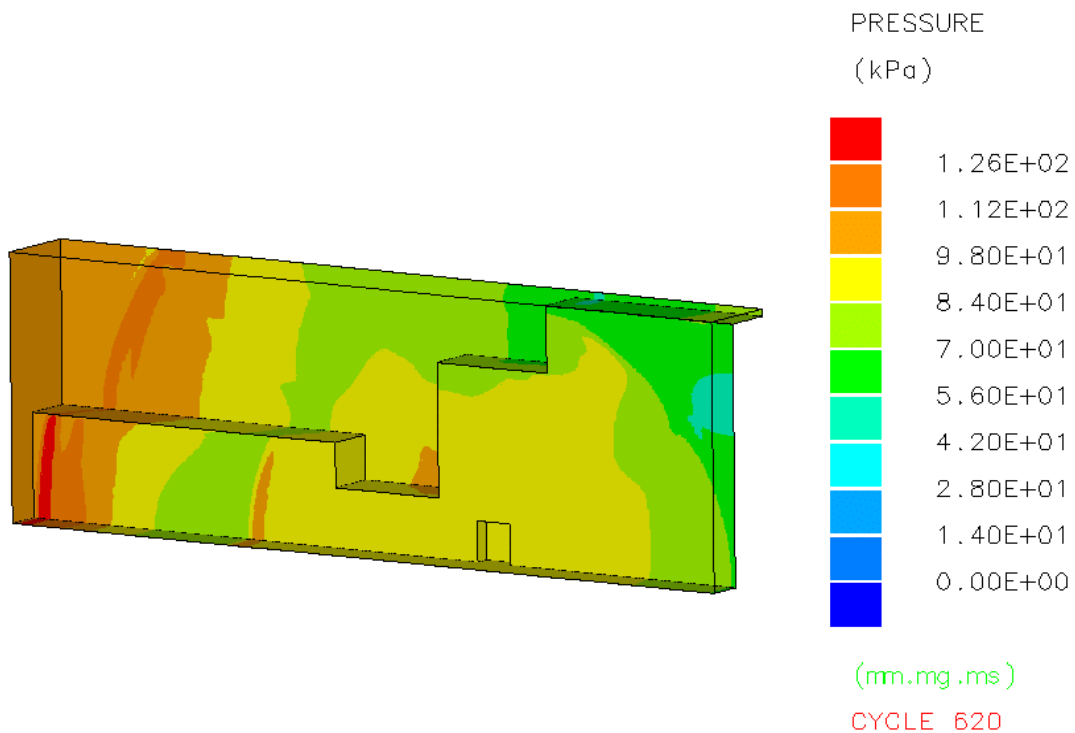
5.1 Propagación de la onda de presión

Por razones de espacio, en este punto, solamente se presentan los resultados obtenidos para una de las alternativas analizadas. En particular, es analizado el caso de 300 Kg de TNT con ubicación del foco 2 (Ver Tabla 1 y Figura 2).

La propagación de la onda de presión en la vereda del edificio de la AMIA es mostrada en Figura 8. Puede observarse que la onda de presión comienza con simetría y regularidad (Figuras 8 a-b). Sin embargo, las múltiples reflexiones en los edificios y en el suelo conducen a un flujo de presiones complicado y totalmente asimétrico (Figuras 8 d-e)







Es evidente que la subdivisión del problema en Modelos 1 y 2 no afecta los resultados obtenidos en la vereda del edificio blanco del ataque (Modelo 1). La incidencia de la onda de presión reflejada en la vereda de enfrente está totalmente desfasada y es de menor intensidad que la onda principal. Esto es debido a las distancias relativamente grandes entre las fachadas de ambas veredas.

Sin embargo, en la vereda de enfrente (Modelo 2) la situación es diferente. Se verificó en análisis preliminares que existía acoplamiento entre la onda principal y la reflejada en el edificio blanco del ataque. Debido a esta razón, la fuente principal de reflexión que es el portal de entrada del edificio 1, fue incorporada en el Modelo 2.

5.2 Presiones e impulsos sobre las fachadas de los edificios

De acuerdo a lo mencionado en el punto 4.2, todas las variables de interés son almacenadas en los puntos de control. Esto constituye un gran volumen de datos que debe ser cuidadosamente evaluado y analizado. Desde el punto de vista de los objetivos del trabajo, hay dos variables que son de particular interés: La presión y el impulso específico asociado.

Se presenta en Figura 9 la distribución de picos de sobrepresión en la vereda del edificio 1. A modo de ilustración, se presentan también en Figura 9 los picos de sobrepresión para la misma situación, obtenidos con fórmulas empíricas¹. Resulta evidente, de Figura 9a el efecto que tiene despreciar las reflexiones de ondas y el efecto mach. Por otra parte, las limitaciones

reconocidas en la literatura¹ para las fórmulas empíricas en el campo cercano son observadas claramente en Figura 9b.

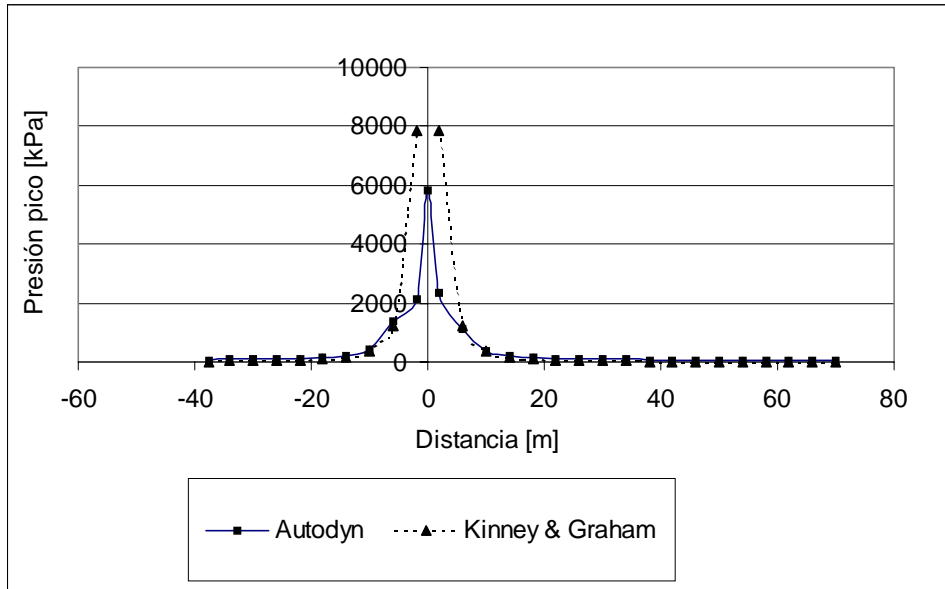


Figura 9 a) Altas presiones

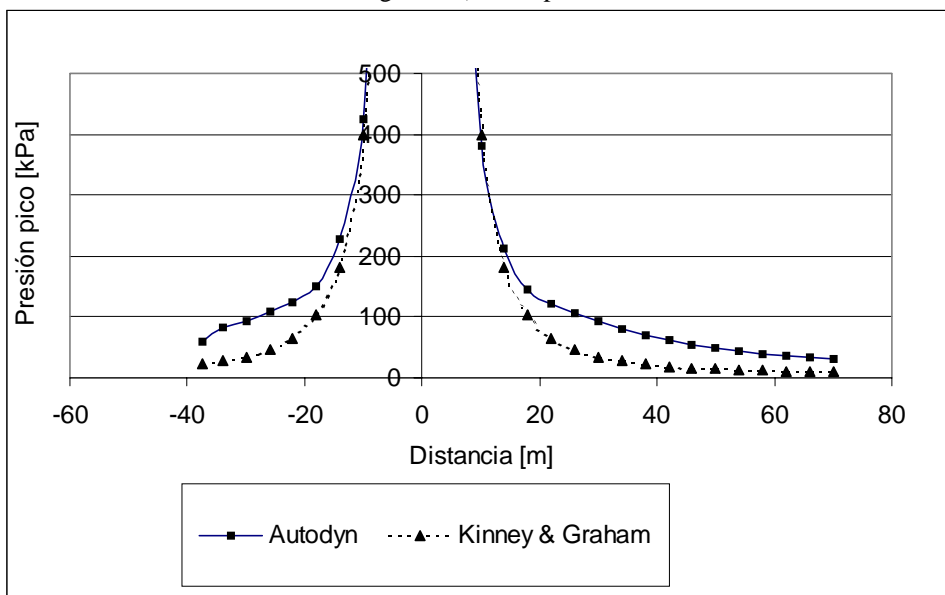
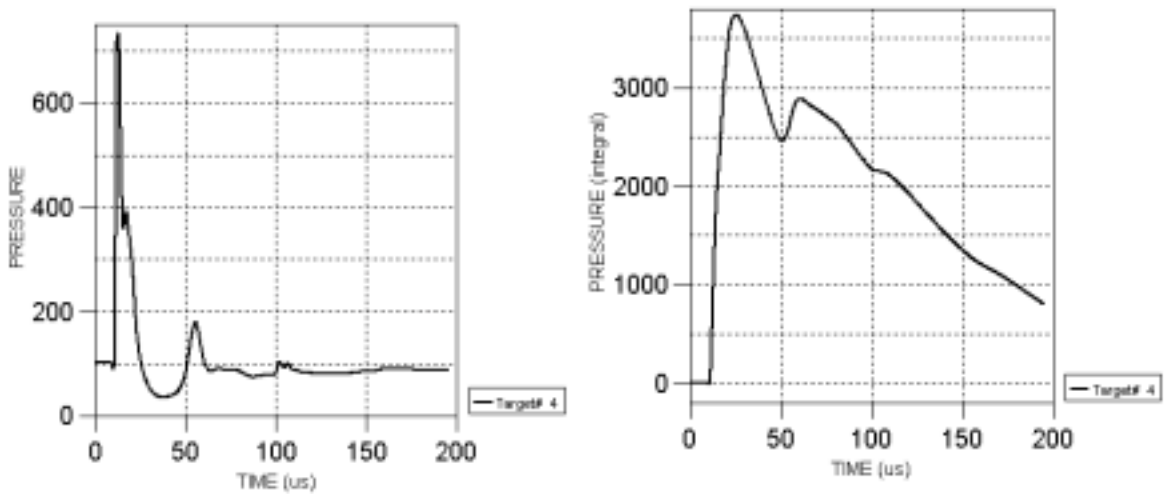


Figura 9 b) Bajas presiones

Figura 9. Distribución espacial de picos de presión en la vereda del edificio 1.

En Figura 10 se presentan los registros temporales de la presión e impulso correspondientes a un punto localizado a 3 m de altura en la fachada del edificio 4 (Figura 1 b). Ambos gráficos corresponden a valores reflejados.



a) Presiones reflejadas b) Impulsos reflejados
 Figura 10. Registros temporales en Edificio 4. 300 Kg de TNT. Ubicación 1

En Figura 11 se presenta la distribución de presiones e impulsos reflejados, para varias de las alternativas analizadas, a lo largo de una línea vertical ubicada en la fachada del edificio 4. Este edificio fue elegido para este análisis porque es más sensible que otros edificios a la diferencia de masas y ubicación de explosivo. Puede observarse que, debido a la ley de la raíz cúbica⁹, grandes variaciones en la carga de explosivo no producen diferencias tan importantes en los picos de las presiones e impulsos. Este hecho indica la dificultad para la evaluación precisa de masas de explosivo usados en ataques terroristas. También puede observarse en figura 11 que, debido a los efectos de múltiples reflexiones de la onda de presión, ubicaciones más distantes del foco de la explosión no siempre conducen a reducciones en las presiones e impulsos pico. Estos resultados nunca podrían haber sido obtenidos con fórmulas empíricas.

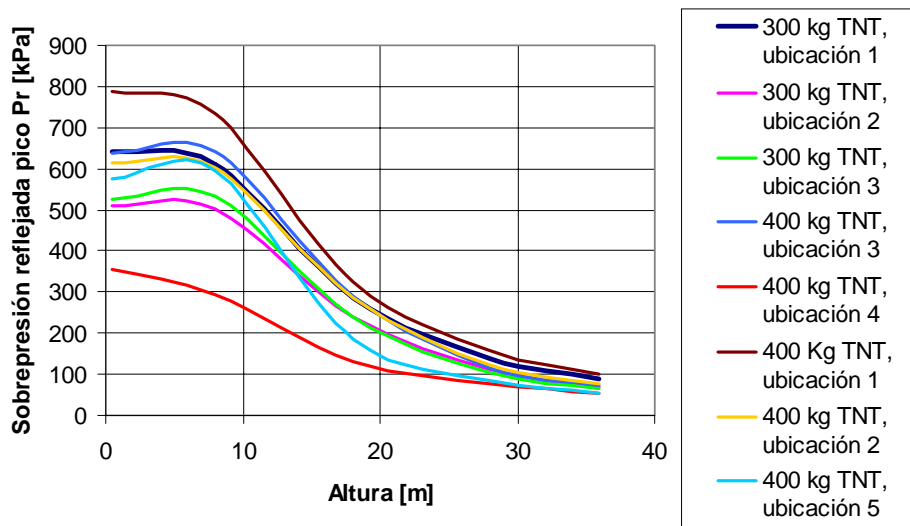


Figura 11 a) Sobrepresiones reflejadas

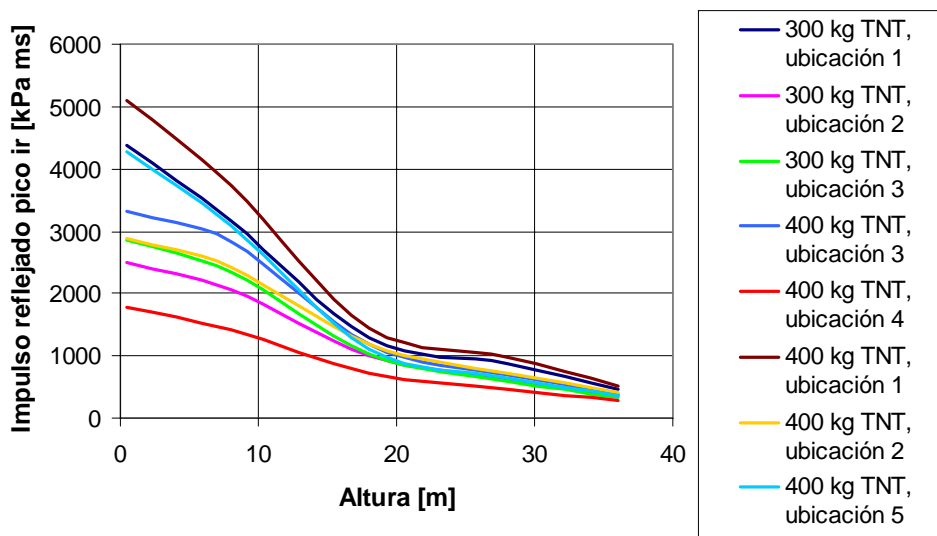


Figura 11 b) Impulsos reflejados

Figura 11. Valores máximos de sobrepresiones e impulsos reflejados sobre la fachada del edificio 4

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la distribución de presiones e impulso producidos en un ambiente urbano por la detonación de cargas explosivas. Los valores obtenidos constituyen un dato importante para el diseño de estructuras sometidas a cargas explosivas ya que una mejor cuantificación de los efectos debería conducir a un diseño más confiable y, eventualmente, de menor costo. Por otra parte, los resultados de este tipo de análisis podrían ser utilizados para la determinación de la masa y localización del explosivo en caso de atentados terroristas.

De acuerdo a los resultados presentados en este trabajo, es claro que el uso de expresiones empíricas no es suficiente para la evaluación precisa de presiones e impulsos incidentes en escenarios urbanos complejos. Estas fórmulas empíricas no consideran las múltiples reflexiones de la onda de presión ni el efecto “mach”, lo que conduce a importantes subestimaciones de los picos de presión e impulso en el “campo lejano”. Por otra parte, las expresiones empíricas no son confiables en el “campo cercano” debido a la complejidad de los flujos de presión involucrados en la formación de la onda de presión.

Por otra parte, los valores pico de presión e impulso en un edificio determinado no siempre disminuyen con la distancia del foco de la explosión. Esto es debido a los complicados efectos de reflexiones producidas en un ambiente urbano congestionado y nunca podrían obtenerse con el uso de expresiones empíricas.

Es importante notar que, para descartar falsas combinaciones de masa y localización del explosivo, el edificio más apropiado para el análisis no necesariamente coincide con el edificio blanco del ataque. Normalmente, los edificios ubicados enfrente del blanco son más sensibles a los cambios de masa y localización de explosivo, en términos de presiones e impulsos y el correspondiente daño asociado.

7 REFERENCES

- [1]. Kinney G.F., Graham K.J. *Explosive shocks in air*. 2nd Edition, Springer Verlag, (1985).
- [2]. Ambrosini, R.D., Luccioni B.M., Danesi R.F., Riera J.D. and Rocha M.M. "Size of Craters Produced by Explosive Charges on or Above the Ground Surface". *Shock Waves*, Springer Verlag. 12(1), 69-78, (2002).
- [3]. Fairlie G.E. "Efficient analysis of high explosive air blast in complex urban geometries using the AUTODYN-2D & 3D hydrocodes". *Analytical & Experimental Methods, Military Aspects of Blast and Shock*, Banff, Alberta, Canada, 14-19 (1997).
- [4]. Hayhurst C.J. and Fairlie G.E. "Quantifying the effects of explosions." *Protecting Buildings from Explosion Seminar*, ImechE, London UK, 24 (1994).
- [5]. Birnbaum N.K., Clegg R.A., Fairlie G.E., Hayhurst C.J. and Francis N.J. "Analysis of blast loads on buildings". *ASME Pressure Vessels and Piping Conference. "Structures Under Extreme Loading Conditions"*, Montreal, Quebec, Canada, 21-26 (1996).
- [6]. Formby S.A., 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).
- [7]. Elliot C.L., Mays G.C. and Smith P.D. "The protection of buildings against terrorism and disorder". *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings*, 94, 287-297 (1992).
- [8]. Elliot C.L., Mays G.C. and Smith P.D. "The protection of buildings against terrorism and disorder. Discussion." *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings*, 104, 343-350 (1994).
- [9]. Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A., *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier, Amsterdam (1983).