

Determinación de cargas generadas por explosiones en ambientes urbanos

Daniel Ambrosini ⁽¹⁾, Bibiana Luccioni ⁽²⁾, Rodolfo Danesi ⁽³⁾

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es la determinación de la masa de explosivo y la ubicación del foco de la explosión generada por un ataque terrorista en un ambiente urbano congestionado. La metodología presentada es especialmente útil cuando las dimensiones del cráter generado por la explosión son inciertas o desconocidas.

Se realizó un análisis computacional para la determinación de presiones e impulsos en las fachadas de los edificios de una cuadra en un ambiente urbano real. Se realizaron simulaciones correspondientes a diferentes combinaciones de masa de explosivo - ubicación del foco. Por otra

parte, se realizó la evaluación del daño producido en los edificios a través de la utilización de las curvas de isodaño que relacionan, en forma aproximada, las presiones e impulsos con los daños producidos. Posteriormente se definieron contornos de igual daño y se trazaron los mapas de isodaño en toda la cuadra, para las diferentes alternativas analizadas.

Por último, a través de la comparación de los daños reales y los simulados computacionalmente, pudieron descartarse las alternativas no coincidentes.

Palabras clave: Explosiones, propagación de ondas, presiones, impulsos, daño estructural, atentado, hidrocódigos, ambientes urbanos.

⁽¹⁾ Prof. Dr. 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/>

⁽²⁾ Prof. Dr. Instituto de Estructuras, Fac.de Ciencias Exactas y Tecnología, Univ. Nacional de Tucumán. Av. Roca 1800, 4000 Tucumán, Argentina. Tel: 54-0381-4364087. Fax: 0381 4364087.
e-mail: labest@herrera.unt.edu.ar, web page: <http://herrera.unt.edu.ar/iest>

⁽³⁾ Prof. Ph.D. Instituto de Estructuras, Fac.de Ciencias Exactas y Tecnología, Univ. Nacional de Tucumán. Av. Roca 1800, 4000 Tucumán, Argentina. Tel: 54-0381-4364087. Fax: 0381 4364087.
e-mail: rdanesi@herrera.unt.edu.ar, web page: <http://herrera.unt.edu.ar/iest>

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. Por otra parte, pueden encontrarse en la literatura (Kinney and Graham 1985; Ambrosini et al. 2002) algunas expresiones empíricas para la determinación de las dimensiones del cráter pero, de acuerdo a Kinney and Graham (1985), los resultados pueden tener un coeficiente de variación del 30%. Sin embargo, existen muchas situaciones en las que el cráter no se forma o desaparece bajo los escombros. 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.

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 y no pueden utilizarse para la evaluación de presiones e impulsos en este tipo de escenarios (Smith et al. 2002). En este trabajo se utiliza un hidrocódigo (AUTODYN 2001) 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. En este trabajo se correlaciona las presiones e impulsos con la respuesta estructural, en particular con el daño producido por las mismas a través de los diagramas de isodaño.

Fairlie (1997), Hayhurst and Fairlie (1994) y Birnbaum et al. (1996) aplican las técnicas computacionales usadas en este trabajo a otras situaciones y objetivos.

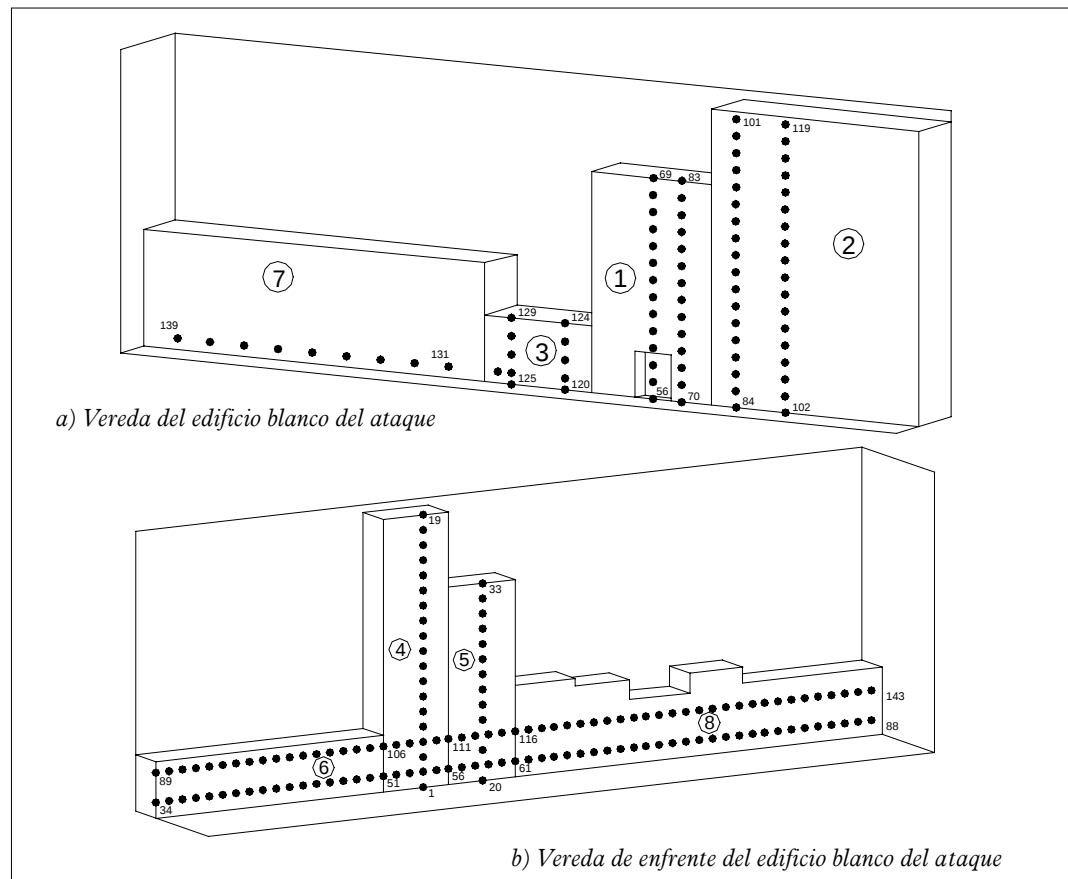


Figura 1: Ambiente urbano considerado y puntos de control.

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.

Este escenario corresponde a la cuadra de Pasteur al 600 de la ciudad de Buenos Aires. El blanco del ataque, denotado como 1 en la Figura 1, corresponde al edificio de la Asociación Mutual Israelita Argentina (AMIA) 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 TNT (Formby and Wharton 1996). 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 (Elliot et al. 1992; Millington 1994) 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.

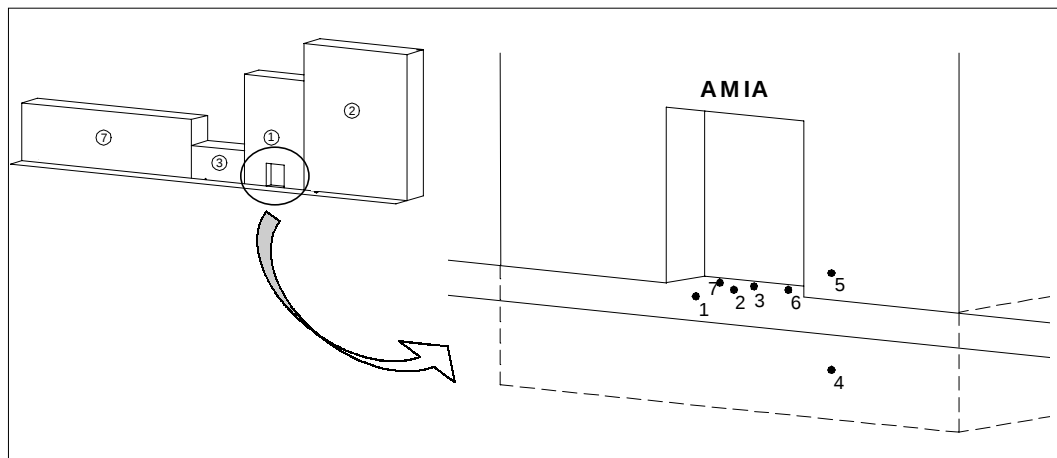


Figura 2: Ubicaciones posibles del foco de la explosión.

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. Por ello, el problema en estudio es dividido en dos etapas: a) Detonación y expansión inicial y b) Propagación de la onda explosiva.

3.2 Detonación y expansión inicial

La detonación y expansión inicial de la esfera de explosivo es considerada 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.

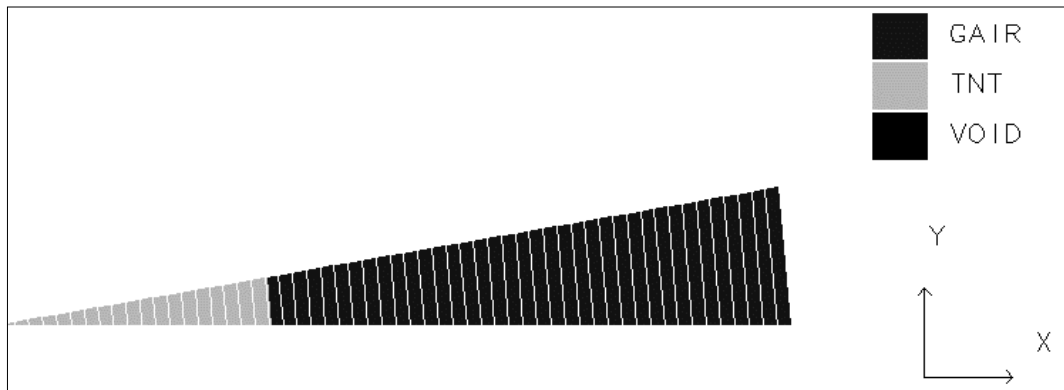


Figura 3: Modelo unidimensional.

Para ilustrar esta etapa de expansión inicial se llevó a cabo un remapeo en 2D y en Figura 4 se muestra 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 3D.

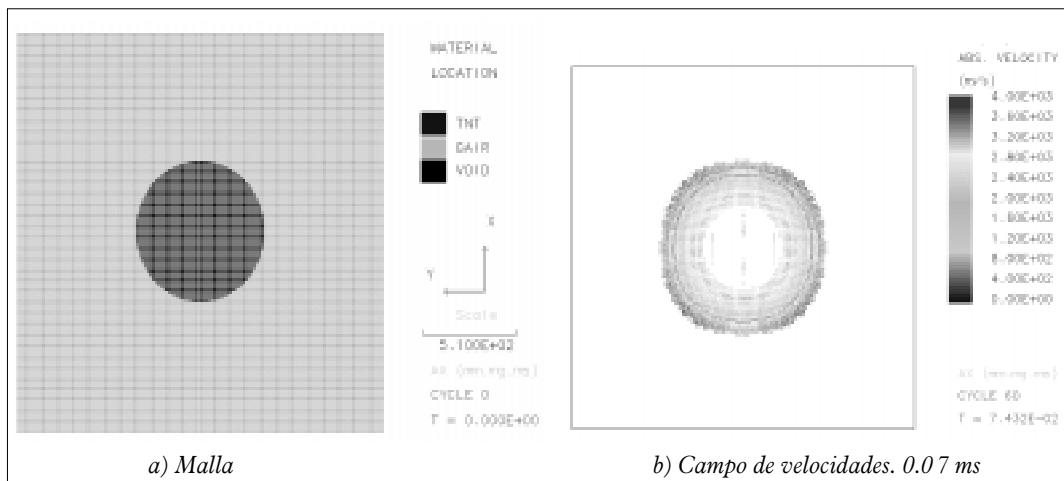


Figura 4: Modelo bidimensional.

4. Propagación de la onda de presión

4.1 Modelo computacional

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 Figura 5. La cantidad de “elementos” es 380.000 y 615.000 respectivamente. Las implicancias teórico-numéricas de esta subdivisión serán discutidas en la sección siguiente.

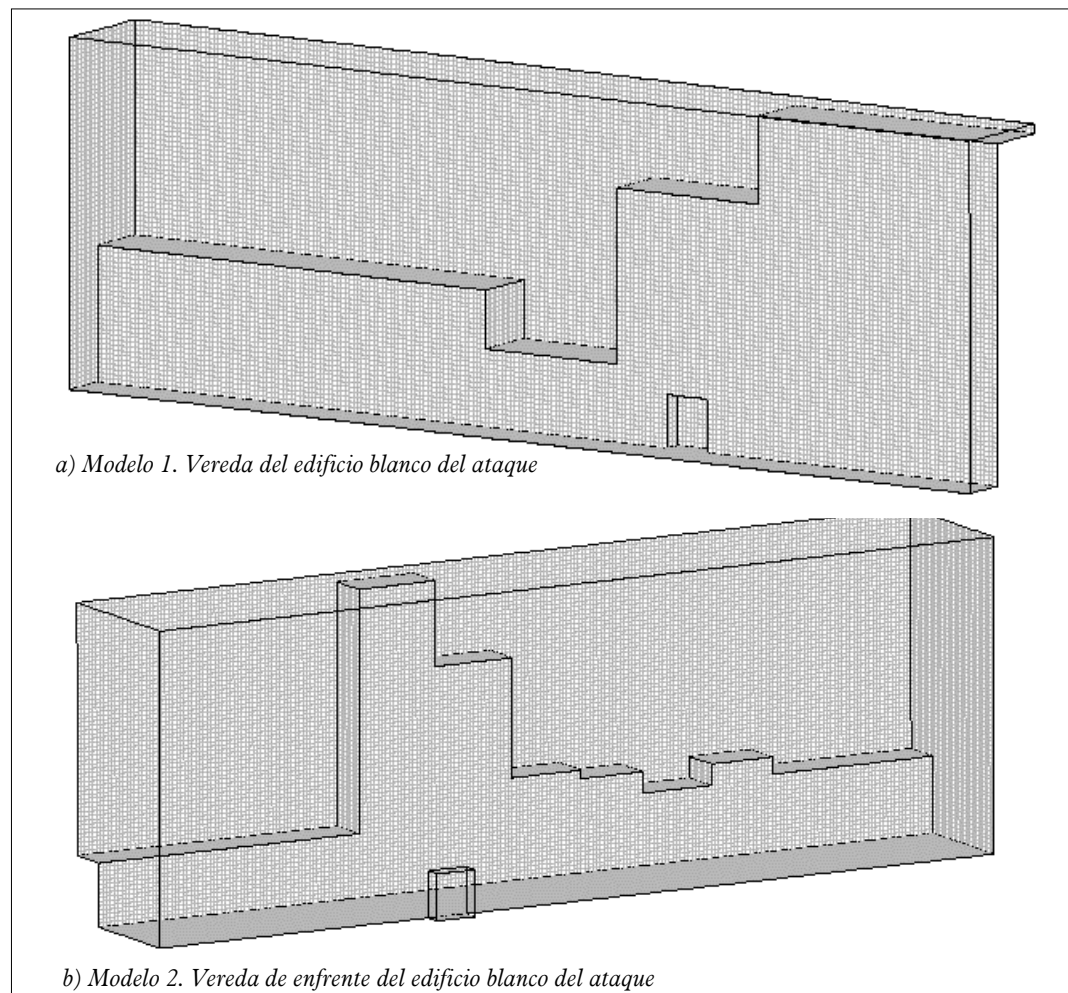


Figura 5: Modelos computacionales.

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 un condición de borde “flow-out”, el cual es un borde transmisor que permite “continuar” la onda de presión por dicho contorno sin reflejarse.

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).

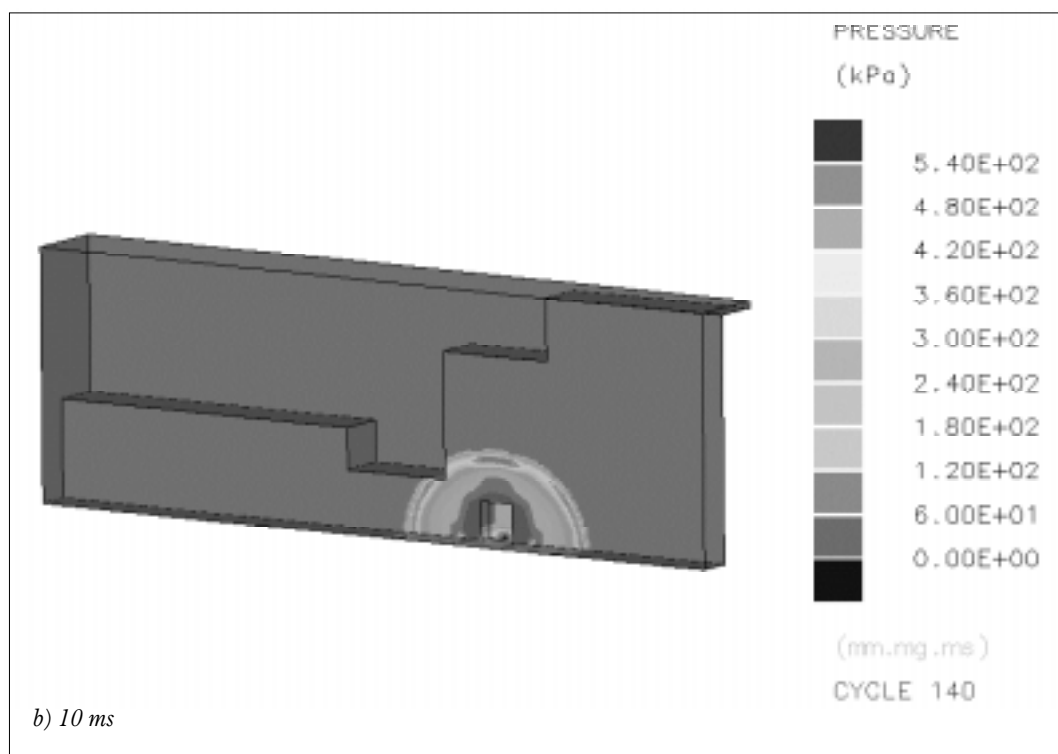
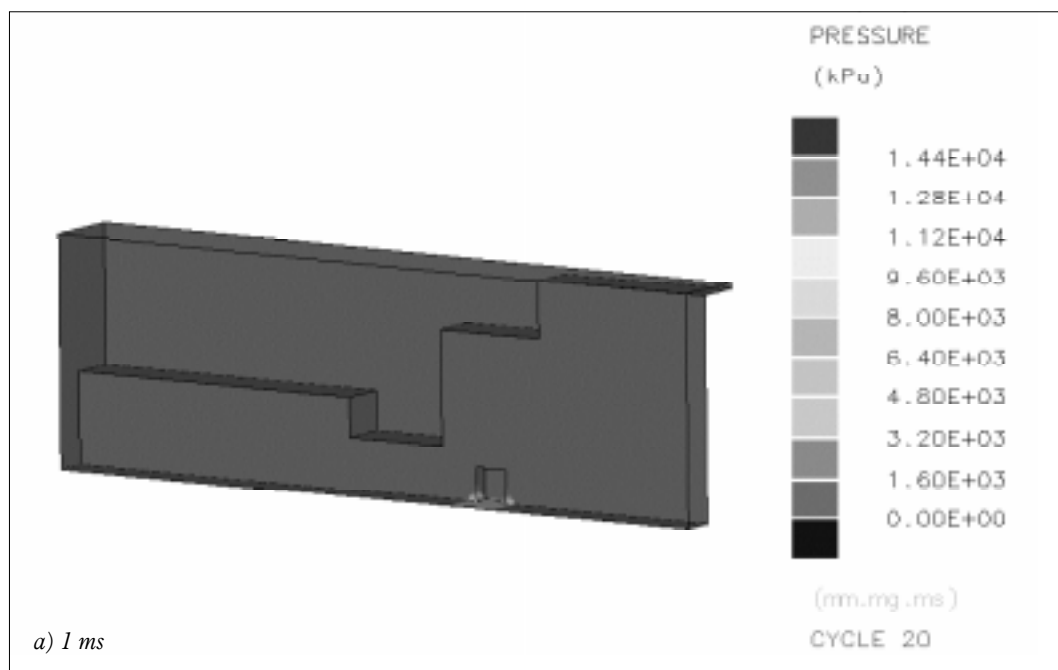
5. Resultados y discusión

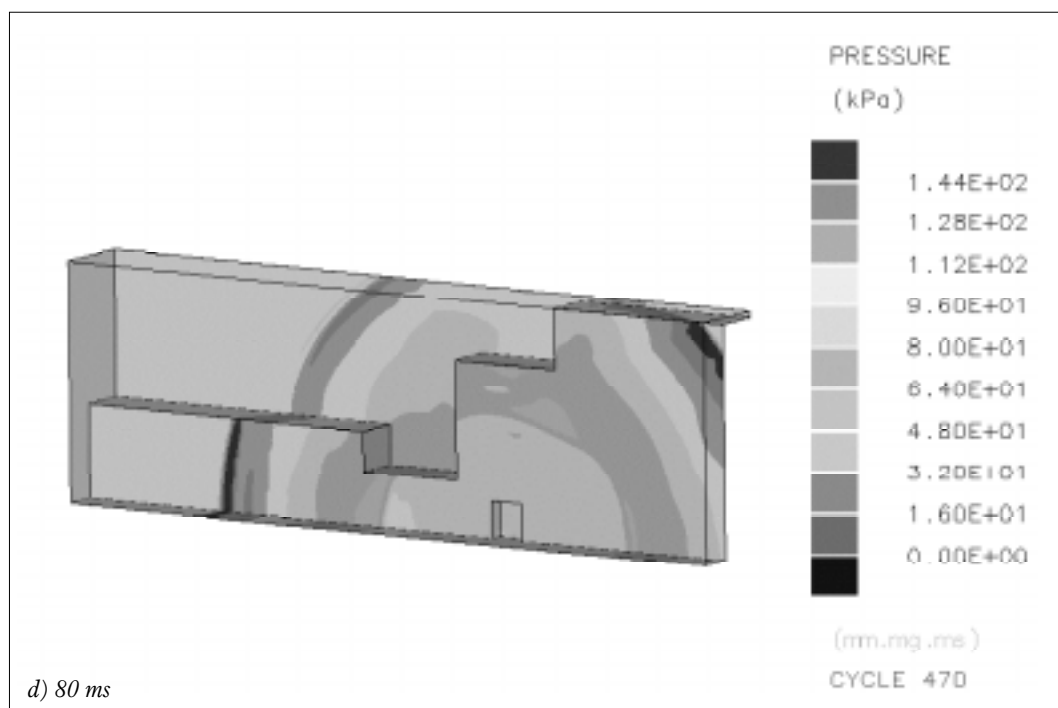
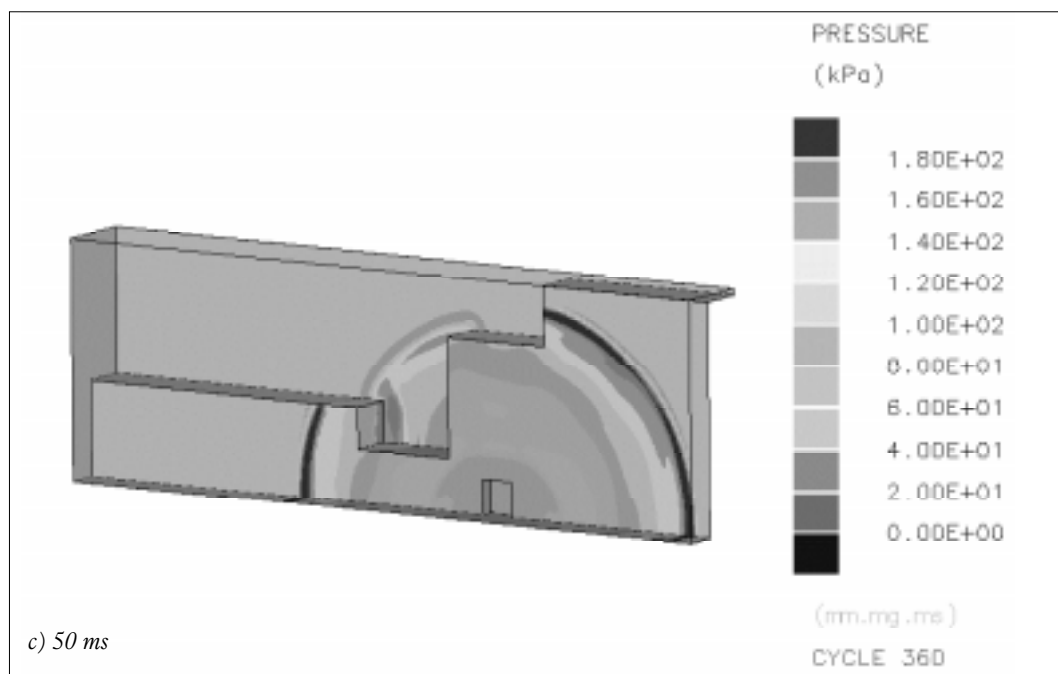
5.1 Propagación de la onda de presión

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 blanco del ataque es mostrada en Figura 6. Puede observarse que la onda de presión comienza con simetría y regularidad (Figuras 6a y 6b). Sin embargo, las múltiples reflexiones en los edificios y en el suelo conducen a un flujo de presiones complicado y totalmente asimétrico (Figuras 6d y 6e).

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





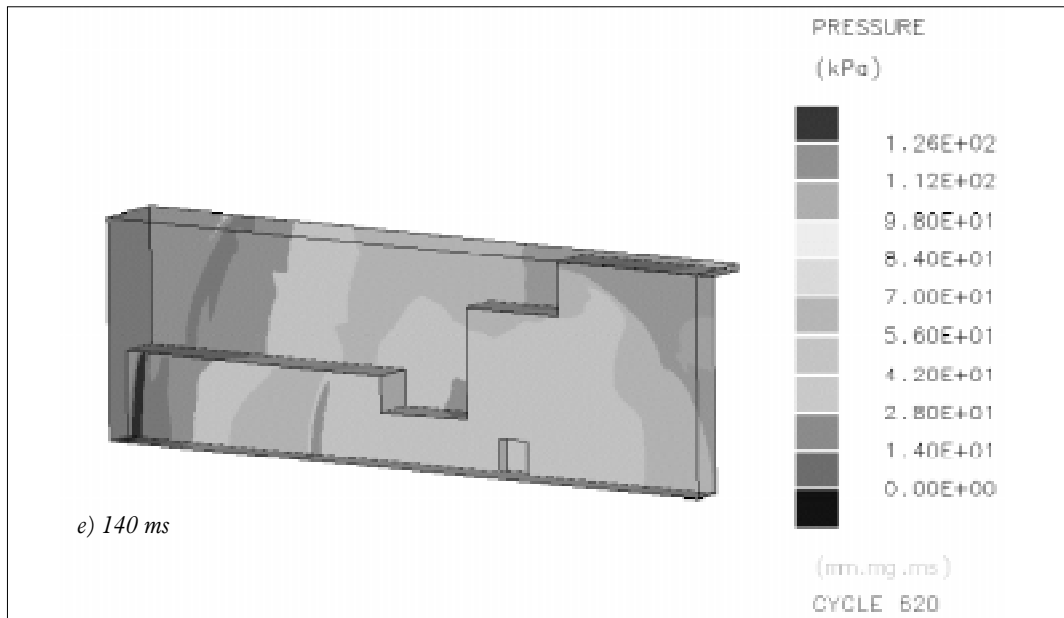


Figura 6: Propagación de la onda de presión. Modelo 1.

razón, la fuente principal de reflexión que es el portal de entrada del edificio 1, fue incorporada en el Modelo 2.

Se presenta en Figura 7 la distribución de picos de sobrepresión en la vereda del edificio 1. A modo de ilustración, se presentan también en Figura 7 los picos de sobrepresión para la misma situación, obtenidos con fórmulas empíricas (Kinney and Graham 1985). Resulta evidente, de Figura 7a el efecto que tiene despreciar las reflexiones de ondas y el efecto mach. Por otra parte, las limitaciones reconocidas en la literatura para las fórmulas empíricas en el campo cercano son observadas claramente en Figura 7b.

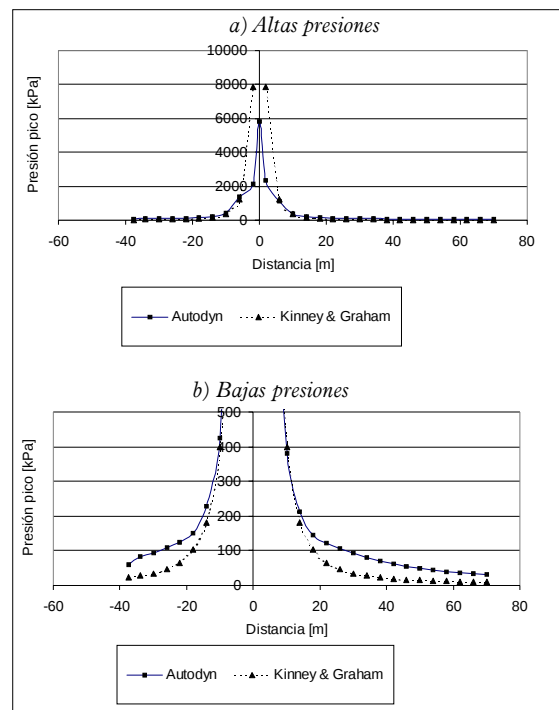


Figura 7: Distribución espacial de picos de presión en la vereda del edificio 1.

5.2 Presiones e impulsos sobre las fachadas de los edificios

De acuerdo a lo mencionado en el punto anterior, todas las variables de interés son almacenadas en los puntos de control. 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. En Figura 8 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. Por otra parte, en Figura 9 se presenta la distribución de picos de presión reflejados a lo largo de una línea vertical sobre la fachada del edificio 4.

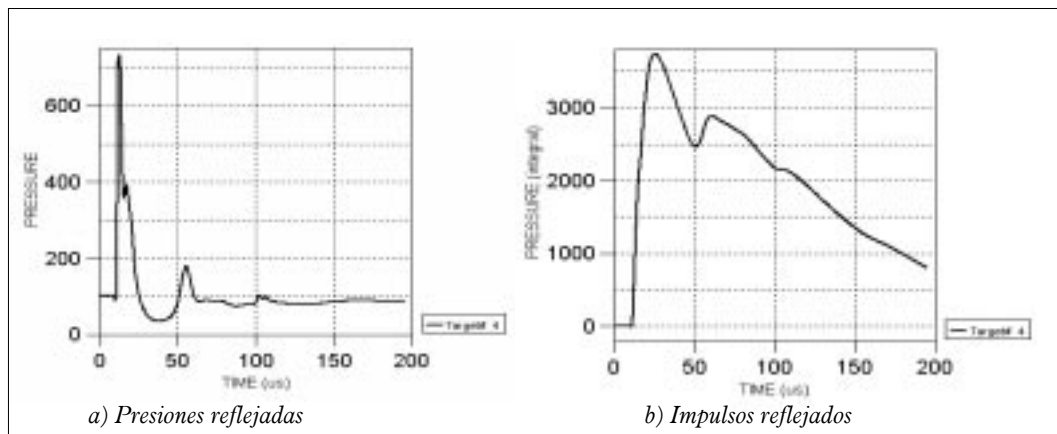


Figura 8: Registros temporales en Edificio 4. 300 Kg de TNT. Ubicación 1.

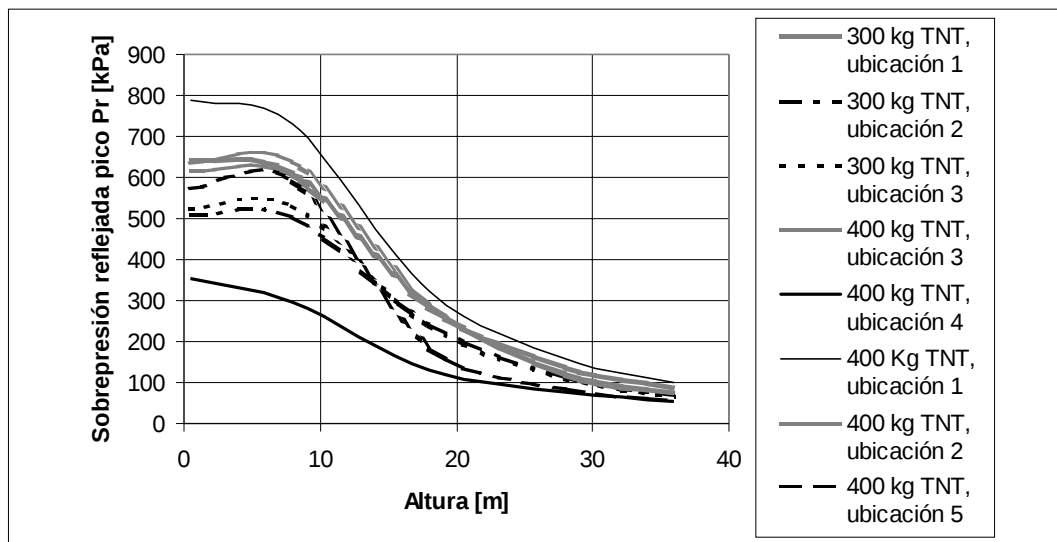


Figura 9: Valores máximos de sobrepresiones reflejados sobre la fachada del edificio 4.

Se reconoce como una limitación de este análisis la hipótesis por la cual las fachadas de los edificios son consideradas como rígidas lo que conduce a una sobrestimación de presiones e impulsos. En la realidad, parte de la energía generada por la explosión es disipada en el proceso de destrucción de las estructuras. Sin embargo, de acuerdo a ensayos numéricos realizados y teniendo en cuenta otras herramientas usadas como las curvas de isodaño, esta simplificación no afecta significativamente los resultados finales.

5.3 Curvas de igual daño

Cuando un frente de onda originado por la explosión se encuentra con una superficie sólida, se produce una modificación instantánea de la presión debido a la reflexión de la onda incidente y a la acción de la presión dinámica o viento. En general, el valor pico de la presión reflejada depende de la intensidad de la onda incidente, del ángulo con el cual se intercepta la superficie, y de la naturaleza de la superficie.

En lo que sigue, se utilizan los valores de sobrepresión máxima e impulso reflejado máximo obtenidos para poder hacer una predicción del daño que hubiera causado en las fachadas de los edificios la situación de explosión considerada. A los efectos de realizar tal análisis sin necesidad de modelar las estructuras de cada uno de los edificios de la cuadra, se pueden utilizar las denominadas curvas de iso-daño o igual daño

que se encuentran en la bibliografía (Elliot et al. 1992; Millington 1994) que permiten determinar el nivel de daño a partir de los valores de presión e impulso obtenidos. En general, se trata de diagramas obtenidos de una vasta recopilación de resultados de daño en viviendas de mampostería y edificios, tanto a partir de ensayos experimentales como de observación de explosiones reales. Dichos diagramas tienen formas similares a los obtenidos en forma teórica para sistemas estructurales simples.

Uno de los diagramas utilizados en este trabajo es el propuesto por Elliott et al. (1992) que relaciona los distintos niveles de daño con el impulso máximo incidente y con la máxima sobrepresión incidente. Para poder comparar los resultados obtenidos en los puntos de control ubicados en las fachadas que corresponden a valores de presión e impulso reflejado, se convirtieron los diagramas de Elliot et al. (1995) en gráficos presión reflejada máxima en función del impulso reflejado. Para ello se utilizaron expresiones empíricas y ábacos que se encuentran en la bibliografía sobre el tema, resultando el gráfico de Figura 10 en el que se relacionan los niveles de daño antes indicados con sobrepresión reflejada máxima e impulso reflejado máximo. Los distintos niveles de daño definidos en la Fig. 10 corresponden a:

- Zona A (sobre línea B): Demolición prácticamente completa;
- Línea B: Daño severo como para requerir demolición. 50 a 70 % de la

mampostería de ladrillos externa destruida o insegura;

- Línea Cb: Daño que hace a la vivienda temporariamente inhabitable. Parcial colapso del techo y uno o dos muros externos. Elementos divisorios portantes con severo daño que requieren reemplazo;

- Línea Ca: Daño estructural relativamente menor pero suficiente como para hacer que la vivienda sea temporariamente inhabitable. Divisiones y carpintería arrancada de sus soportes;

- Zona D (bajo línea Ca): Daño que demanda reparación urgente pero no suficiente como para hacer al edificio inhabitable. Daño en los cielorrasos y tejados. Más del 10% de los vidrios rotos.

Las curvas de la figura muestran que para presiones muy bajas, es la presión la que define el nivel de daño, mientras que para presiones altas el nivel de daño está dado por el impulso. La utilización

de las curvas propuestas por Elliot et al. (1995) tiene el inconveniente de que los niveles de daño no hacen referencia precisa al tipo de estructura o pared a la que se refiere. Una alternativa utilizada es un diagrama presentado por Millington (1994). Se trata de curvas que relacionan sobrepresión incidente con la distancia para distintos niveles de daño y cantidades de explosivo. Estas curvas tienen una especificación mayor de los niveles de daño. Las curvas corresponden a daños provocados por cargas explosivas entre 1Kg de TNT y 500 Kg de TNT ubicadas a distintas distancias. Al igual que en el caso anterior, estas curvas fueron convertidas a curvas de sobrepresión máxima reflejada en función de impulso máximo reflejado para los distintos niveles de daño, con el objeto de que puedan servir para la estimación del daño provocado por las distintas alternativas simuladas. En la Fig. 10 se presentan los diagramas resultantes.

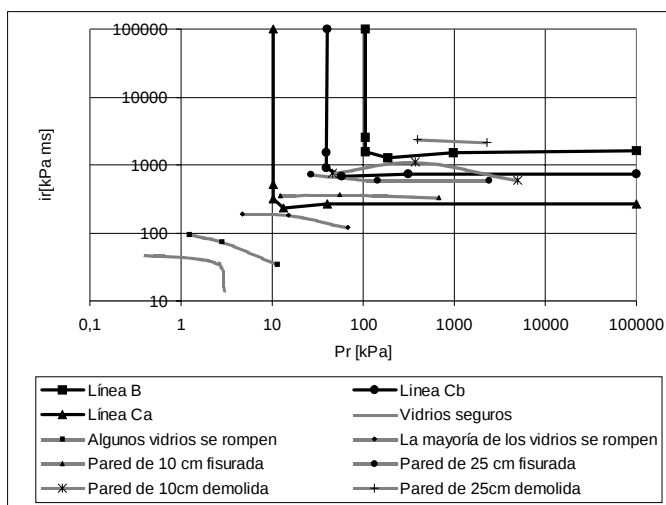


Figura 10: Niveles de daño. Presión e impulso reflejados.

Los límites de los diagramas de ambos autores son similares. El nivel de daño correspondiente a demolición definido por Elliot se encuentra entre las curvas correspondientes a demolición de una pared de 10 cm y la correspondiente a la demolición de una pared de 25 cm propuestas por Millington.

5.4 Resultados simulados en los diagramas de igual daño

En este punto, los resultados de las presiones e impulsos obtenidos en la simulación numérica, para algunos edificios significativos, son incorporados en los diagramas de isodaño. Por razones de espacio, sólo se presentan los resultados obtenidos para los edificios 1 y 4.

• Edificio 1 (Blanco del ataque): En Figura 11 se presentan los picos de sobrepresión e impulso reflejados a lo largo de una línea vertical ubicada en el centro de la fachada del edificio y a partir de 0.25 m de altura. Los valores representados corresponden a los puntos de control indicados en Figura 1. Puede observarse que, de acuerdo a lo esperado, los valores de presión e impulso disminuyen con la altura. Los puntos ubicados en la parte inferior de la fachada presentan valores mayores que el nivel de demolición total.

• Edificio 4 (clave): En Fig. 11 se presentan los picos de sobrepresión e impulso reflejados a lo largo de una línea vertical en el centro de la fachada del edificio y a partir de 0.25 m de altura. Los valores corresponden a los puntos de control indicados en Fig. 1.

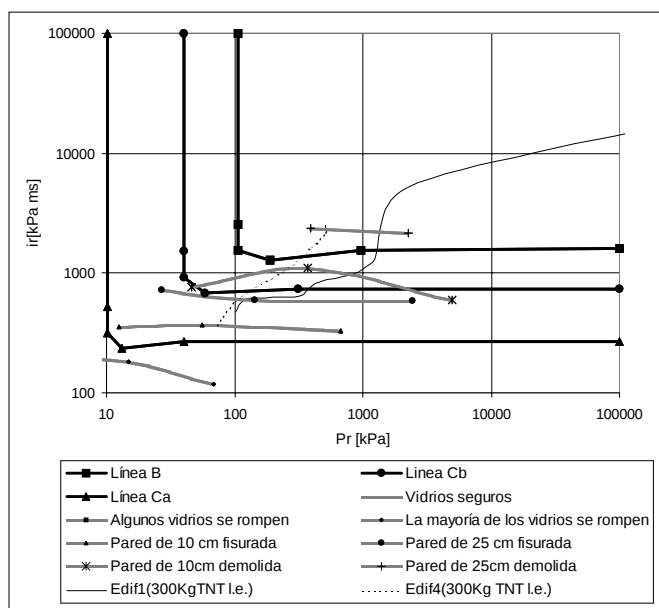


Figura 11: Niveles de daño, Edificio 1. 300 kg TNT. Línea edificación.

5.5 Mapas de igual daño

En esta sección se presentan los llamados mapas de igual daño o iso-daño que son definidos como los diagramas con los diferentes niveles de daño espacialmente identificados en la cuadra del edificio blanco del ataque.

De acuerdo a las curvas de igual daño presentadas anteriormente, para el tipo de explosión en estudio, el daño se puede definir a partir de los niveles de impulso reflejado máximo i_r , como sigue: 1.- $i_r > 3000$ kPa ms (Destrucción de estructura de hormigón armado). 2.- $1000 \text{ kPa ms} < i_r < 3000 \text{ kPa ms}$ (Demolición de paredes de mampostería, daño en estructuras de hormigón). 3.- $500 \text{ kPa ms} < i_r < 1000 \text{ kPa ms}$ (Fisuración de paredes de mampostería). 4.- $180 \text{ kPa ms} < i_r < 500 \text{ kPa ms}$ (Mayor parte de vidrios rotos, daño en elementos de cerramiento, cielorrasos, marquesinas, etc.)

Para trazar los mapas de daño se debe tener en cuenta, además, el tipo de configuración estructural sobre la que está incidiendo el impulso máximo, en el sentido de que si el impulso máximo reflejado es suficiente para demoler la estructura portante del edificio en ciertos pisos, el edificio resulta demolido por arriba de esos pisos. Teniendo en cuenta los niveles de impulso máximo reflejado y la consideración anterior se trazan los mapas de daño presentados en Figura 12 (Sólo se presenta una alternativa por razones de espacio), donde los distintos niveles de daño definidos corresponden a:

- ☒ 1.- Demolición total.
- ☒ 2.- Demolición de paredes de mampostería, daño en estructuras de hormigón
- ☒ 3.- Fisuración de paredes de mampostería.
- ☐ 4.- Mayor parte de vidrios rotos, daño en elementos de cerramiento, cielorrasos, marquesinas, etc.
- ☐ 5.- Algunos vidrios sanos.

5.6 Mapas de daños reales

Con el objeto de hacer posible la aplicación de la metodología propuesta, debe realizarse una inspección muy detallada de los daños sobre el área afectada. Técnicos e ingenieros entrenados deberían realizar esta inspección visual teniendo en mente los distintos niveles definidos en las curvas de isodaño a ser usados en el análisis. Para la inspección visual es importante tener en cuenta que los edificios ubicados frente al edificio blanco del ataque son más sensibles, en términos de picos de sobrepresiones e impulsos y daños asociados, a los cambios de masa de explosivo y foco de la explosión. En consecuencia, la inspección de estos edificios “claves” debe hacerse con el mayor nivel de detalle.

En el caso en estudio, el ataque al edificio de la AMIA, ingenieros de la Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE) de Argentina realizaron la inspección de daños y los resultados fueron volcados en un detallado repor-

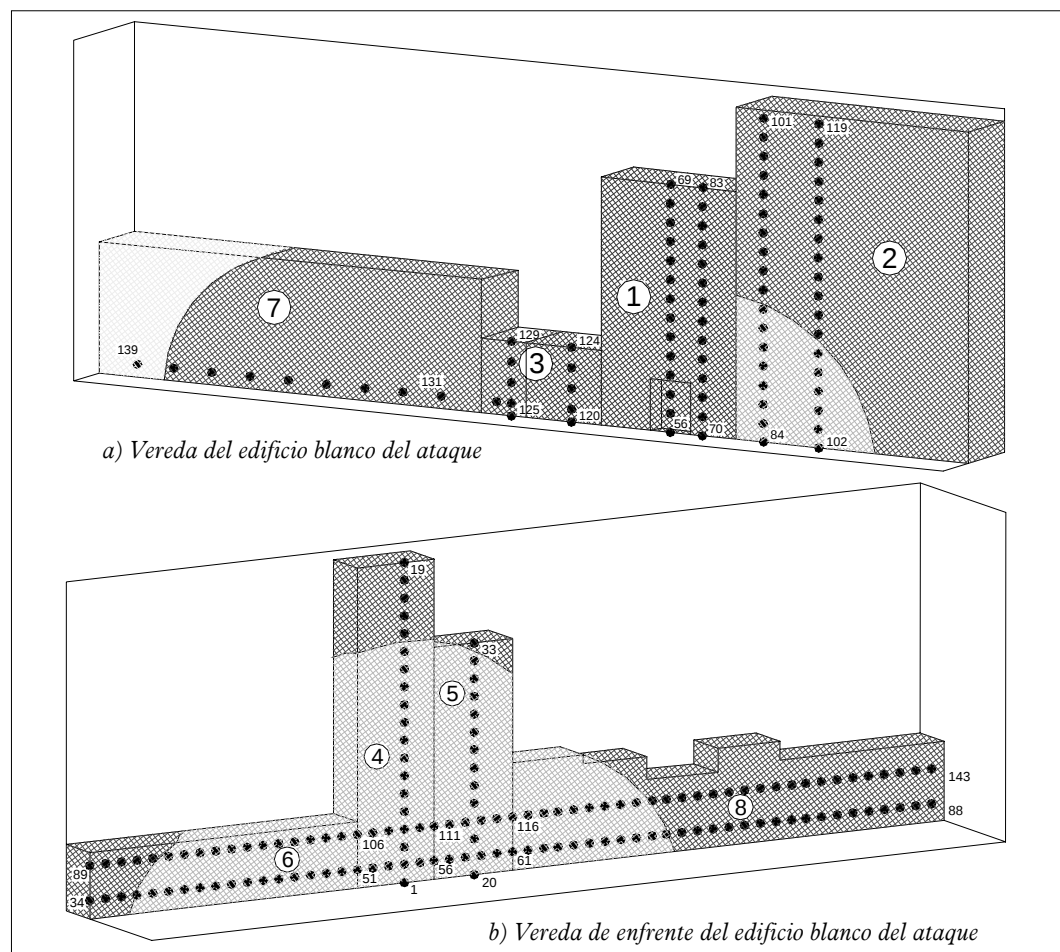


Figura 12: Mapas de daño. 400 kg de TNT en la línea de edificación.

te. Además, cientos de fotografías fueron analizadas con el objeto de verificar los daños reales.

El resultado de esta etapa del análisis debe ser condensado en mapas de daño similares a los presentados en la sección anterior. En el caso en estudio, el mapa de daños reales es presentado en Figura 13. El escenario de daños reales puede resumirse de la siguiente manera:

Edificio de AMIA completamente destruido ■ edificio de mampostería 3 parcialmente colapsado ■ edificios 7 con fisuración en las fachadas de mampostería, edificio 2 con daño en la mampostería adyacente al edificio de AMIA ■ Edificios 4 y 5 con mampostería dañada y daños en la estructura de hormigón armado hasta el piso cinco. Rotura de vidrios en toda la cuadra ■.

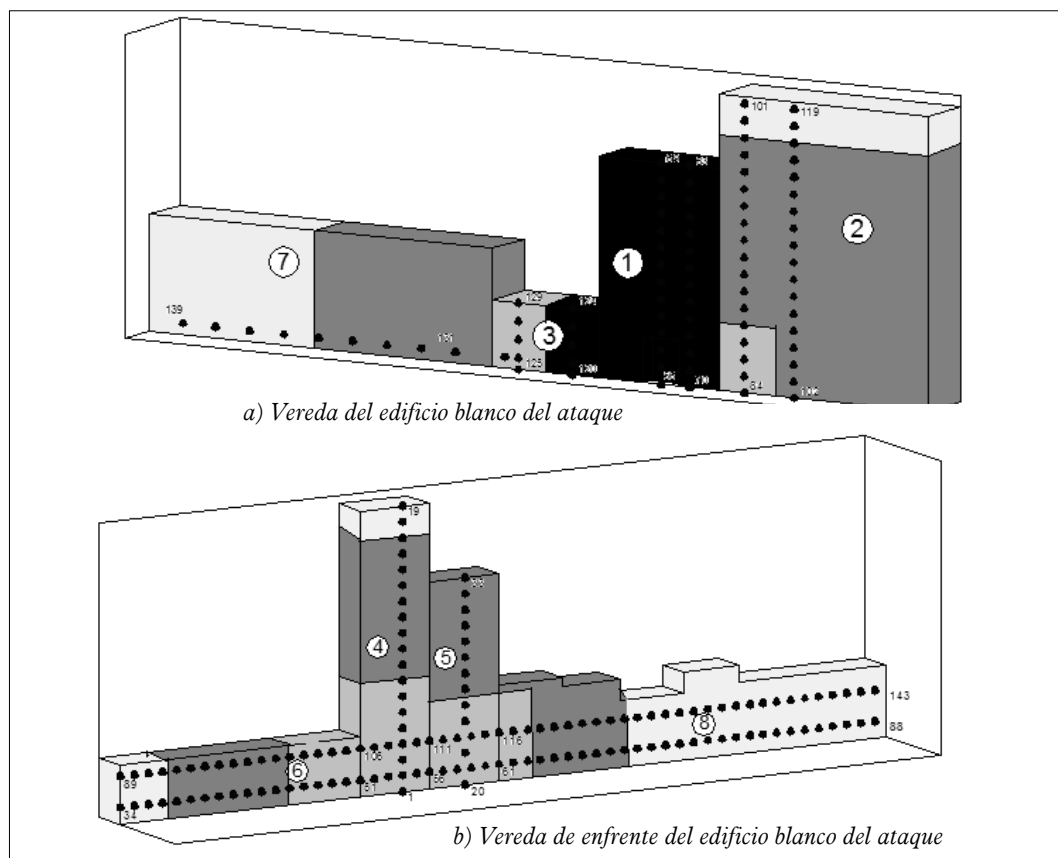


Figura 13: Mapas de daño reales.

5.7 Comparación de daños reales y simulados

El último paso en la metodología desarrollada consiste en la comparación entre los mapas de daño simulados para las distintas alternativas con los obtenidos para los daños reales. Este procedimiento conduce a descartar la mayoría de las combinaciones consideradas al comienzo del análisis. Comparando Figuras 12 y 13 puede observarse que, cuando el foco de la explosión está ubicado en la posición 1 y la carga es de

400 kg de TNT, se obtienen en ambos modelos daños significativamente mayores que los reales y, por lo tanto, esta alternativa puede ser descartada.

Realizando esta comparación para todas las alternativas simuladas, se seleccionan los casos para los cuales los daños simulados son similares a los reales. De este modo se obtiene la masa del explosivo y su localización más probable. El foco de la explosión determinado, se localiza dentro del rectángulo mostrado en Figura 14 y la masa de explosivo determinada está entre 300 y 400 kg de TNT.

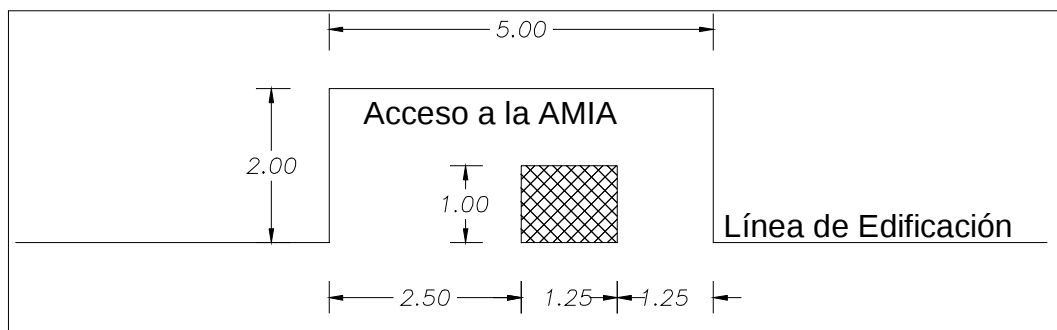


Figura 14: Ubicación más probable del foco de la explosión.

6. Discusión y conclusiones

En este trabajo se presenta una metodología para la determinación de la masa y ubicación de explosivo en atentados, especialmente adecuada para el caso que no se cuenta con las dimensiones del cráter generado.

En primer lugar 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 de menor costo. Adicionalmente se discute el uso de dichos valores en la evaluación del daño de elementos estructurales y no estructurales

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

edifícios ubicados enfrente del blanco son más sensíveis a los cambios de masa y localización de explosivo, en términos de presiones e impulsos y el correspondiente daño asociado.

Referencias

Ambrosini, R.D.; Luccioni, B.M.; Danesi, R.F.; Riera, J.D. and Rocha, M.M (2002). Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface. *Shock Waves*, Springer Verlag, v. 12, n. 1, p. 69-78.

AUTODYN (2001). *Interactive non-linear dynamic analysis software*, version 4.2, user's manual, Century Dynamics Inc.

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

Birnbaum, N.K., Clegg R.A., Fairlie, G.E., Hayhurst, C.J. and Francis, N.J. (1996). Analysis of blast loads on buildings. *Proceeding of ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Structures Under Extreme Loading Conditions*, Montreal, Quebec, Canada, 21-26 July 1996.

Elliot, C.L.; Mays, G.C. and Smith, P.D. (1992). The protection of buildings against terrorism and disorder. *Proceeding of Inst. of Civil Engineers: Structures & Buildings*, v. 94, p. 287-297.

Fairlie, G.E. (1997). Efficient analysis of high explosive air blast in complex urban geometries using the AUTODYN-2D & 3D hydrocodes. *Proceeding of Analytical & Experimental Methods, Military Aspects of Blast and Shock*, Banff, Alberta, Canada, p. 14-19, Sept. 1997.

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

Hayhurst, C.J. and Fairlie, G.E. (1994). Quantifying the effects of explosions. *Proceeding of Protecting Buildings from Explosion Seminar, ImechE*, London UK, 24 November 1994.

Kinney, G.F. and Graham, K.J. (1985). *Explosive shocks in air*. 2nd Edition, Springer Verlag.

Millington, G.S. (1994). Discussion of: "The protection of buildings against terrorism and disorder" by Elliott, C.L.; Mays, G.C. and Smith, P.D. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings*, v. 104, p. 343-346.

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

Smith, P.D. and Rose, T.A. (2002). Blast loading and building robustness. *Progress in Structural Engineering and Materials*. v. 4, n. 2, p. 213-223.

Load determination of an explosive device detonated in an urban environment

Abstract

A methodology to determine the location and mass of explosive in terrorism attack when the location of the crater is unavailable is presented in this paper and applied to the case of the AMIA (Israel-Argentina Mutual Association) building attack occurred in Buenos Aires, Argentina in July 1994. A computational dynamic analysis was carried out over the congested urban environment that corresponds to the opposites rows of buildings of a block, in the same street. Many alternatives corresponding to different locations and explosive mass were simulated and the corresponding distribution of pressures and impulses which were used to evaluate, with the aid of isodamage curves, the distribution of damage on building facades for the different alternatives simulated and compare them with the real observed damage. The methodology allows the determination of the most probable location of the focus of the explosion and the mass of the explosive used in the attack.

1. Scenario and alternatives analyzed

The urban environment analyzed is presented in Figure 1. This figure corresponds to the two rows of buildings of a block, in the opposite sides of the same street. The AMIA building denoted as 1 in Figure 1a was the target of the attack. According to the main objective, many alternatives of mass of explosive and locations were analyzed.

Explosive mass: 200, 300, 400 and 500 kg of TNT were used because they are in the medium range of terrorist attacks to buildings. Locations: Considering the building 1 (Figure 1a) as the main target of the attack, seven possible locations were considered that are indicated in Figure 2. The trial locations were inferred from a visual inspection of photograph of damages and result in correspondence with the front of the target building.

2. Generation of blast loading

The case in study was divided into two stages. The initial detonation and expansion of the sphere of high explosive are modeled in a 1D, spherically symmetric model of 1m radius with a JWL equation of state. The 1D expansion analysis continued until just prior to impingement of the blast wave on the rigid surface. At this time a 1D remap file was created and then imported into a three-dimensional model, allowing the reflection of the blast wave off the ground to be modeled.

Wave propagation

In view of the large number of degrees of freedom involved in one square model, the urban environment was subdivided in two models: One corresponding to the row of buildings where the target building was located and other that corresponds to the row of building in the opposite side of the street. After many trials, a size of 0.5 m for the cubic cells was found to make a compromise between the accuracy of the solution and the computational cost. The model was solved with an Euler formulation in which the nodes are fixed and the material (air) flows. The buildings were defined as “unused” regions and were considered to behave as rigid surfaces. The other boundaries of the model were defined as transmitting boundary condition that allows a stress or pressure wave to con-

tinue “through” the physical boundary of the model without reflection.

The propagation of the pressure wave in one side of the street is showed in Figure 6. It can be seen that the stress wave starts with symmetry and regularity but multiple blast wave reflections in the buildings and soil leaded to a complicated blast wave pattern.

3. Isodamage curves

The use of the so-called isodamage curves that can be found in the literature (Elliot et al. 1992, Millington 1994) seems to be a more attractive way to approximately relate pressures and impulses to damage produced in different types of buildings and parts of them. In general, isodamage curves have been obtained from a vast compilation of damage produced in masonry houses and buildings in not only experimental but also actual explosions.

4. Simulated results in the isodamage diagrams

The results of the simulated pressure and impulses, for all of the buildings and all the alternatives analyzed, are plotted in the isodamage diagrams. Its clear that for each alternative simulated the spatial distribution of damage in the buildings facades is different.

5. Simulated maps of damage

Condensed diagrams with the different levels of damage resulting from the previous analysis, can be made. Taking into account the isodamage curves defined by other authors, numerical levels of reflected impulses were defined for different types of damage in structural and non structural elements, in order to construct the simulated maps of damage for all the alternatives analyzed. One map of simulated damage is showed in Figure 11.

6. Real map of damage

A detailed inspection over the entire affected zone should be carried out. Trained engineers and technicians should make this visual inspection. The result of this stage of the analysis can be condensed in diagrams with the different levels of damage spatially identified in the greatest possible zone within the affected zone (Real map of damage). In the case in study, engineers of the Structural Engineers Asociation (AIE) from Argentina carried out the inspection of damages. Moreover, hundreds of photographs were examined in order to verify the real damages. The map of real damage is showed in Figure 12.

7. Comparison of simulated and real damages

The last step in the methodology presented above is the comparison between the simulated maps of damage with those obtained for real damages. This procedure leads to discard most of the combinations considered at the beginning of the analysis. Following with this type of analysis for all the alternatives considered and selecting the cases for which simulated damage are similar to actual damages, the locations and masses were obtained. The focus of the explosion was located within the dashed rectangle showed in Figure 9 and the mass of explosive was 300 to 400 kg of TNT.

Conclusions

A methodology to assess the correlation between pressures and impulses and the structures response, particularly the resulting global damage was presented. The so-called maps of damage constitute an innovative element in order to identify zones with different types of damage. This complete methodology allows the evaluation of the location and mass of explosive used in a terrorist attack.

According to the results presented in the paper, it is clear that, the use of empirical expressions is not enough for the accurate evaluation of incident pressure distributions and associated impulses in complex urban environments. Neglecting reflections and the “mach effect” of the blast wave could lead to important underestimation of the peak values in the far field. Moreover, empirical expressions are not applicable with confidence in the near field because of the complexity of the flow processes involved in forming the blast wave.

The more appropriate building to be analyzed in order to discard false combinations of mass of explosive and locations, does not necessarily match with the target building because many combinations lead to the total destruction of the building, which is the more probable real situation. Normally, the buildings located in front of the target are more sensitive, in terms of peak overpressures, impulses and the associated damages, to the changes of the mass of explosive and location of the focus of the explosion.