

## ESTUDIO NUMÉRICO DE EXPLOSIONES CONFINADAS EN AMBIENTES URBANOS

**Ramón Codina<sup>a</sup>, Daniel Ambrosini<sup>b</sup>, Fernanda de Borbón<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>Ing., *Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería UNCuyo. CONICET, Mendoza, Argentina, ramonhumbertocodina@yahoo.com.ar, <http://fing.uncu.edu.ar/estructural/index.html>*

<sup>b</sup>Dr. Ing., *Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, CONICET, Mendoza, Argentina*

<sup>c</sup>Dr. Ing., *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, CONICET, Mendoza, Argentina*

**Palabras Clave:** Explosión, Ondas de presión, Ambiente Urbano, Estructuras

**Resumen.** En los últimos años, ataques terroristas en todo el mundo y, en particular, los efectuados en la embajada de Israel en 1992 y el edificio de la AMIA en 1994 en Argentina, han demostrado la necesidad de estudiar el efecto de explosiones en ambientes urbanos.

La estimación de acciones para el diseño de estructuras resistentes a explosiones, tradicionalmente se ha realizado usando cargas de sobrepresión e impulso derivados de métodos empíricos o analíticos simplificados, provistos por manuales técnicos como UFC 3-340, o programas como CONWEP. Estos métodos tienen un buen desempeño para encarar problemas como explosiones esféricas, semiesféricas (explosiones sobre el nivel del suelo), pero no es posible predecir con estas herramientas los parámetros de diseño, para geometrías más complejas de la carga, ni para situaciones donde existan múltiples reflexiones de la onda de presión. En la actualidad, existen herramientas numéricas (hidrocódigos), para resolver el problema.

En este trabajo, se estudian explosiones en ambientes urbanos, para distintas cantidades y ubicación del explosivo, considerando diferentes anchos de calle. El objetivo final es determinar las zonas a lo largo de la calle en las cuales se produce un aumento de las presiones e impulsos debido al efecto de confinamiento producido por las construcciones. Con este fin, se realizó un estudio paramétrico a través de simulaciones numéricas, obteniendo valores de sobrepresión e impulso que permiten evaluar dichos efectos de confinamiento.

## 1 INTRODUCCION

Desde hace ya algunas décadas, se está estudiando el efecto que las explosiones tienen en las estructuras, dichas explosiones pueden deberse a diversas causas, desde accidentes industriales, hasta atentados terroristas (Ngo et al. 2007).

Es importante por lo tanto, el desarrollo de herramientas con el fin de predecir parámetros de diseño, y métodos para mejorar el comportamiento de las estructuras ante este tipo de sollicitaciones (Sorensen et al. 2011).

Tradicionalmente este tipo de problemas, debido a su complejidad, han sido abordados mediante el uso de métodos analíticos simplificados, o empíricos, que se pueden encontrar en manuales técnicos como UFC 3-340-02 (2008), programas como CONWEP y bibliografía como Baker et al (1983). Este tipo de herramientas no son aptas para resolver problemas de geometrías complejas y donde existan múltiples reflexiones de ondas de presión.

Afortunadamente, en los últimos años con el aumento de la capacidad de las computadoras, ha sido posible hacer uso de métodos numéricos, más específicamente hidrocódigos, para resolver este tipo de problemas. Como ejemplo se puede citar trabajos como Alia et al. (2006), y Alhussan et al (2011), donde se realizaron modelaciones completas del fenómeno físico involucrado en las explosiones.

El desarrollo de estas herramientas ha permitido la resolución de problemas muy complejos, modelación de explosiones teniendo en cuenta la interacción suelo estructura (SSI), o fluido estructura en forma acoplada. Los trabajos de Lu et al. (2005); Wang et al. (2005); Børvik et al. (2009) and Luccioni et al. (2004), son ejemplos de este tipo de modelaciones.

El estudio de explosiones en espacios confinados como túneles ha sido un tema de interés en ingeniería, Rigas et al (2005) realizó la comparación entre modelos numéricos hechos con el código CFX-5.6 y datos experimentales, Benselama et al. (2009), desarrollo un estudio paramétrico en este campo y Silvestrini et al. (2009) propone un método simplificado para estimar sobrepresiones basado en estudios numéricos.

El tema de explosiones en espacios confinados ha sido motivo de muchos estudios, orientados generalmente a túneles. Sin embargo, estudios sobre explosiones en ambientes urbanos, parcialmente confinados por edificios y calles es un tema mas reciente y menos estudiado, Ambrosini et al (2005) y Luccioni et al (2006), realizaron estudios al respecto usando AUTODYN y Remennikov et al (2005) usando Air3D. En el trabajo de Benselama et al (2010) se mostró la posibilidad de realizar diagramas de isodaño usando la información de este tipo de estudios.

El objetivo de este trabajo es lograr un mejor entendimiento del fenómeno de confinamiento que experimentan ondas de sobrepresión, e impulsos y cómo influyen en éste, parámetros como la cantidad de explosivo, y el ancho de la calle.

Para realizar el estudio numérico se utilizó el hidrocódigo, ANSYS-AUTODYN (2009), con el fin de elaborar un estudio paramétrico de explosiones sobre el nivel del suelo, confinadas lateralmente por las paredes de los edificios

El impulso (ver Figura 1) se calcula como la integral de la presión en el tiempo, por lo tanto se define como impulso máximo registrado  $I_{max}$ , como:

$$I_{max} = \int_{t_a}^{t_b} P_s(t) dt \quad (1)$$

Donde,  $P_s$  es la sobrepresión;  $P_0$  es la presión Atmosférica,  $t_a$  es el tiempo de llegada de la onda de presión;  $t_b$  es el tiempo de fin de la fase positiva.

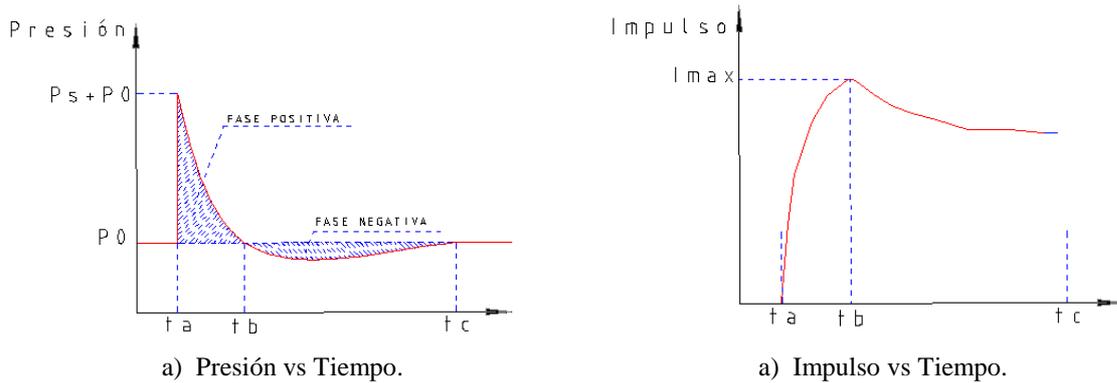


Figura 1. Gráficos típicos de Presión e Impulso.

## 2 DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DEL ESTUDIO

En primer lugar se definieron las cargas explosivas a utilizar, como 100, 500, 1000, 5000, 10000 kg de TNT, las cuales son cargas características que pueden ser colocadas en distintos tipos de vehículos, autos, furgonetas y hasta camiones, FEMA 426(2003).

Por otro lado, se estudiaron los anchos de calle más representativos y se tomó como modelo ciudades europeas como París, Madrid, y Roma. Se llegó a la conclusión que los anchos más representativos son de 6, 12 y 20m, que a modo de ejemplo pueden verse en la Figura 2.



a) Calle de 6m, Nombre: Rue de la Sourdière, París



b) Calle de 12m, Nombre: Rue Saint-Honoré, París



c) Calle de 20m, Nombre: Corso Vittorio Emanuele II, Roma

Figura 2. Ejemplos de calles típicas en ciudades Europeas.

En todos los casos se modeló un espacio de 100m de largo, (largo de una cuadra típica) por el ancho de las respectivas calles estudiadas, y una altura de 20m, la cual es una altura representativa de los edificios en las ciudades tomadas como ejemplo.

La carga explosiva en todos los casos se colocó en la mitad de la longitud de la cuadra, con su parte inferior a 1m del nivel del suelo.

Los edificios se modelaron como superficies rígidas, que permiten una reflexión completa de las ondas de presión.

Debido a la simetría del problema, se modeló solo la mitad del espacio.

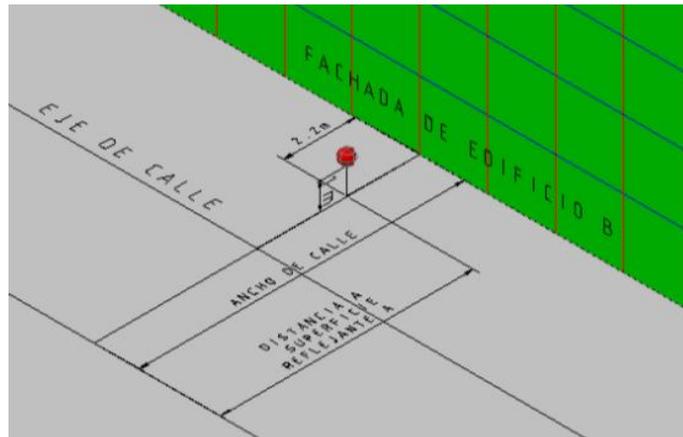


Figura 3. Ubicación de explosivo en la calle.

Previamente se estudió el caso en que el explosivo se encuentra centrado con el eje de la calle, (Codina et al 2012), en este trabajo se desarrolla el caso en que el explosivo se encuentra a 2.2m de uno de los edificios, simulando un coche estacionado (ver Figura 3).

### 3 SIMULACION NUMERICA

Se utilizó una malla Euleriana con el fin de modelar tanto el aire, como el explosivo. Las ecuaciones de estado que gobiernan el comportamiento de los materiales y sus características se detallan a continuación:

#### 3.1 Aire

El aire se modeló como un gas ideal, ecuación (2), que tiene la ecuación de estado más simple.

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (2)$$

En Tabla 1 se presentan las propiedades del aire utilizadas.

$\gamma$	$\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	$T$ [K]	$c_v$ [J/kgK]	$e$ [KJ/m <sup>3</sup> ]
1,4	1,223e-6	288,2	717,6	2,068e5

Tabla 1. Propiedades del aire.

Donde,  $\gamma$  es la Constante Adiabática;  $\rho$  es la Densidad;  $T$  es la Temperatura;  $C_v$  es el Calor Específico;  $e$  es la Energía Interna.

#### 3.2 TNT

El explosivo se modela con las ecuaciones de estado de "Jones - Wilkins - Lee" (JWL), ver ecuación (3). Estas ecuaciones reproducen correctamente el fenómeno de la expansión de gases después de la detonación, (Lee y Tarver 1980).

Cuando la expansión del explosivo alcanza el valor de aproximadamente 10 veces el volumen inicial, puede despreciarse los dos primeros términos de la ecuación (3), y el comportamiento de los gases de la explosión es equivalente al de un gas ideal con un  $\gamma = \omega + 1$ .

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega \epsilon}{v} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

En [Tabla 2](#) se presentan las propiedades utilizadas para el TNT.

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$A$ [KPa]	$B$ [KPa]	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_{C-J}$ [m/s]	$e_{c-j}$ [KJ/m <sup>3</sup> ]	$P_{C-J}$ [KPa]
1,63	3,7377e+8	3,7471e+6	4,15	0,90	0,35	6,93e+3	6,0e+6	2,1e+7

Tabla 2. Propiedades del TNT (EOS JWL)

Donde,  $\rho$  es la densidad;  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  y  $\omega$ , son parámetros de ajuste de JWL;  $V_{C-J}$ , es la velocidad de detonación C-J;  $e$  es la energía interna específica;  $P_{C-J}$ , es la presión C-J.

### 3.3 Condiciones de contorno del problema.

Se utilizaron dos tipos de condiciones de borde, superficies reflejantes rígidas, las cuales reflejan el total de las ondas de presión incidentes, y del tipo transmisoras (flow-out), que permiten que las ondas se transmitan a través de ellas, solo hacia afuera del modelo, y no en sentido opuesto. El primer tipo se usó para representar las fachadas de los edificios y la calle, y el segundo para las zonas donde las ondas se propagan fuera de la zona confinada; la parte superior del modelo y el final de la calle.

## 4 REMAPEO

Se realizaron modelos de calles de 6m, 12m y 20m de ancho. En todos los casos se modeló una altura de 20m, y un largo de 50m hacia ambos lados del explosivo. Debido a las condiciones de simetría, solo fue necesario modelar una mitad la longitud de la calle.

El paso de tiempo para garantizar la estabilidad de un modelo esta dado por la ecuación (5)

$$\Delta t \leq f * \left[ \frac{h}{c} \right]_{min} \quad (5)$$

Donde  $h$  es la dimensión característica del elemento;  $c$  es la velocidad del sonido en el material;  $f$  es el factor de estabilidad del paso de tiempo, normalmente=0.9.

Como puede verse en la ecuación (5), el paso de tiempo para la integración explícita está subordinado al elemento de menor tamaño en la malla, y trae aparejado un problema: el explosivo tiene dimensiones muy pequeñas en comparación con las dimensiones de la calle, y requiere un mallado fino para evitar errores en la modelación. Como consecuencia, si se pretende modelar el explosivo y la calle en el mismo modelo, los tiempos de cálculo son extremadamente grandes.

El programa utilizado tiene una herramienta muy útil para mitigar este problema, el “REMAPEO”, permite modelar explosiones 1D, con una buena discretización, y “mapear” el resultado de dicha modelación en modelos de 2D o 3D, con elementos de mayor tamaño. De esta forma se logran modelaciones muy precisas con mallas más gruesas y tiempos de cálculo muy inferiores.

El remapeo, se puede utilizar ya que el explosivo se modela como esferas, por lo tanto la onda de presión resultado de la detonación, de desarrolla en forma esférica hasta llegar al suelo, que se encuentra a 1 m del contorno del explosivo, en este intervalo la modelación es del tipo 1D, luego se realiza el remapeo de la explosión a un modelo 2D, que tiene el suelo como superficie reflejante, y abarca hasta antes de llegar a la pared más próxima. En este intervalo la explosión toma una configuración de un eje de simetría, por lo que puede realizarse la modelación en 2D con simetría respecto al eje vertical. Una vez que la onda de presión llega a la pared reflejante pierde la simetría respecto del eje vertical, y se convierte en una explosión 3D, en este momento se realiza el remapeo del 2D al 3D. En la [Figura 4](#) se esquematiza el proceso.

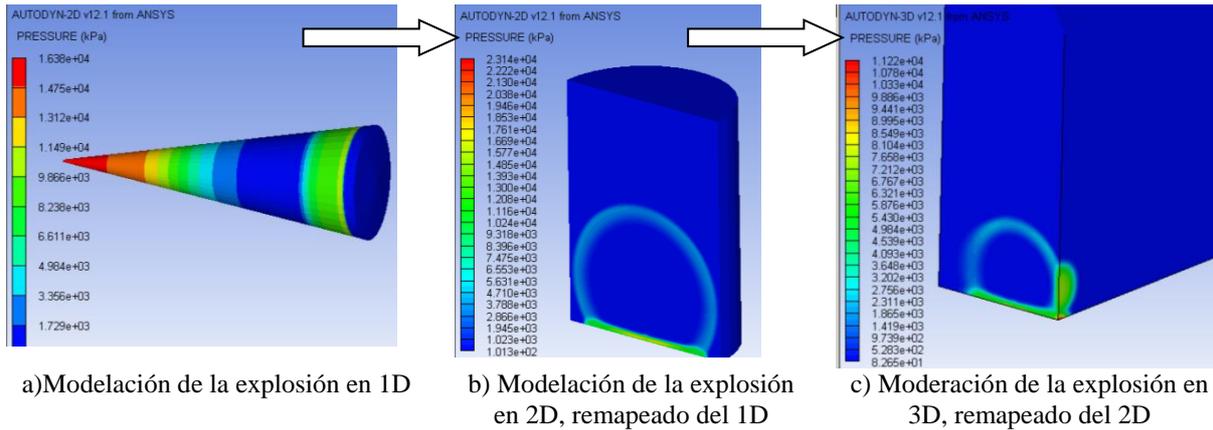


Figura 4. Remapeo de 1D a 2D, y de 2D a 3D

El remapeo, es una técnica que ha sido usada por muchos autores como [Luccioni et al \(2004\)](#), [Luccioni et al \(2006\)](#) o [Benselama et al \(2009\)](#).

### 4.1 Modelos 1D

Las explosiones 1D, se realizaron con dimensiones indicadas en la [Tabla 3](#). En todos los casos se utilizó una malla 1D con 500 elementos, para tener buena precisión en la etapa inicial de la explosión.

Carga de TNT [kg]	Radio del Explosivo [mm]	$R_{max}$ [mm]	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]
100	245	1245	500	500
500	418	1418	500	500
1000	527	1527	500	500
5000	901	1901	500	500
10000	1136	2136	500	500

Tabla 3. Modelos 1D para mapeo a 2D

Donde,  $R_{max}$  es la distancia desde el baricentro del explosivo al suelo, (marca el límite del modelo 1D);  $d_1$  y  $d_2$  son las extensiones donde se distribuyen puntos de control, cada 5mm y cada 10mm, ver [Figura 5](#).

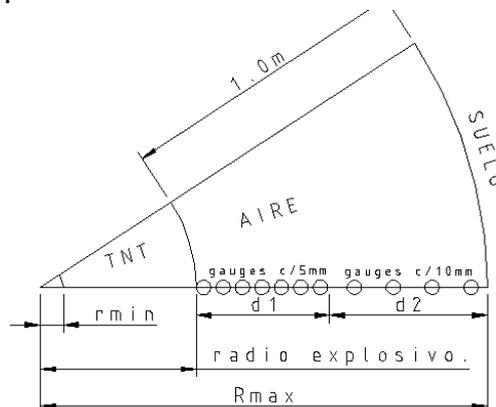


Figura 5. Esquema de explosiones 1D

## 4.2 Modelos 2D

En la malla de los modelos 2D se usaron elementos de 50x50mm, con las características que figuran en [Tabla 4](#).

Ancho de Calle [m]	$B$ [m]	$H$ [m]	$\Delta_x$ [mm]
6, 12 y 20	2.2	6	10

Tabla 4. Modelos 2D para mapeo a 3D

Donde,  $B$  es la distancia del baricentro del explosivo a pared;  $H$  es la altura adoptada para el modelo 2D;  $\Delta_x$  es la separación entre puntos de control adoptada, ver [Figura 6](#).

En el caso de las cargas de 5.000 y 10.000 Kg de TNT, se remapeó del 1D al 3D, ya que el desarrollo de la explosión en su configuración 2D es muy corta, debido a que la distancia entre el centro del explosivo y el suelo es similar a la del centro del explosivo y la pared reflejante mas próxima.

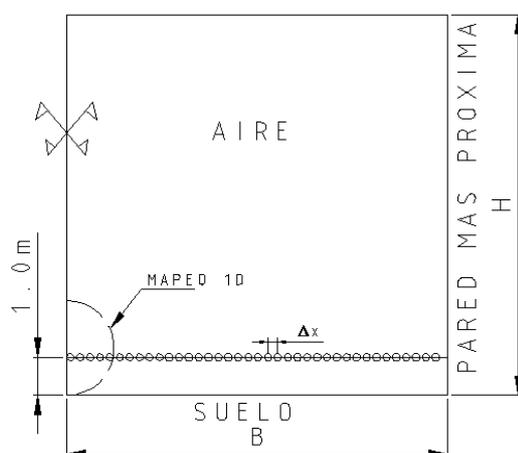


Figura 6. Esquema de explosiones 2D

## 4.3 Modelos 3D

En los modelos 3D, los elementos usados tienen un tamaño de 250mm, la cual es una malla adecuada para las dimensiones de las calles adoptadas para el trabajo, de acuerdo a lo sugerido por [Luccioni et al \(2006\)](#). En la [Tabla 5](#) se resumen sus características:

$B$ [m]	$H$ [m]	$L$ [m]	$\Delta_x$ [mm]	$\Delta_y$ [mm]	Cantidad de elementos
6	20	50	1216	500	384000
12	20	50	2045	600	768000
20	20	50	2045	1000	1280000

Tabla 5. Modelos 3D

Donde,  $B$  es el ancho de la calle a la pared;  $H$  es la altura del espacio modelado, el cual coincide con la altura de los edificios adoptados que son de 20m;  $L$  es la distancia longitudinal desde el centro de la calle al final del espacio modelado, (la mitad de la cuadra característica adoptada de 100m);  $\Delta_x$  y  $\Delta_y$  son la separación longitudinal y trasversal, de los puntos de control adoptados.

Los modelos cuentan con 2 planos de simetría,  $x=0m$ , y  $z=0m$ , y tienen contornos tipo flow-out, en los planos  $x=50m$ , y  $z=20m$ . Ver [Figura 7](#).

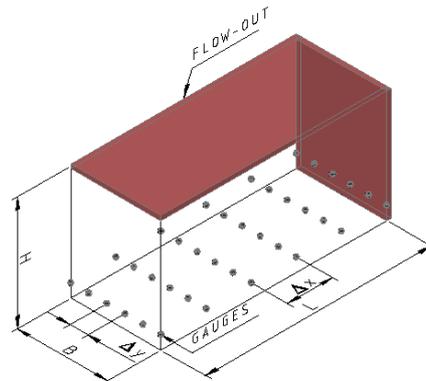
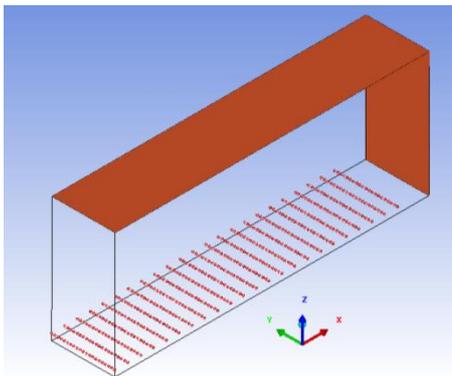
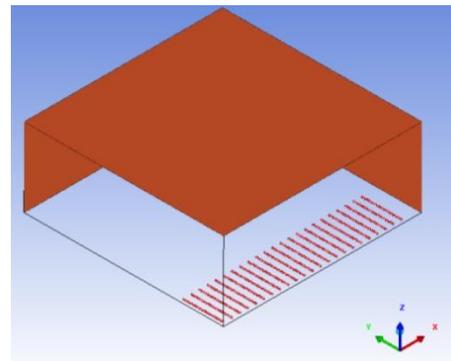


Figura 7. Esquema de modelo para explosiones 3D

Con el objetivo de realizar la comparación de presiones e impulsos de una explosión confinada con una no confinada, se realizaron, para cada una de las explosiones 3D, una versión no confinada con la misma ubicación relativa para los puntos de control respecto al explosivo. Para esto se usó un espacio de  $50m \times 50m \times 20m$ , con un total de 3.200.000 elementos, con planos de simetría para  $x=0m$ ,  $y=0m$  y  $z=0m$ , y contornos del tipo flow-out en  $x=50m$ ;  $y=50m$ ; y  $z=20m$ , como se muestra en la [Figura 8](#).



a) Ejemplo de modelo confinado



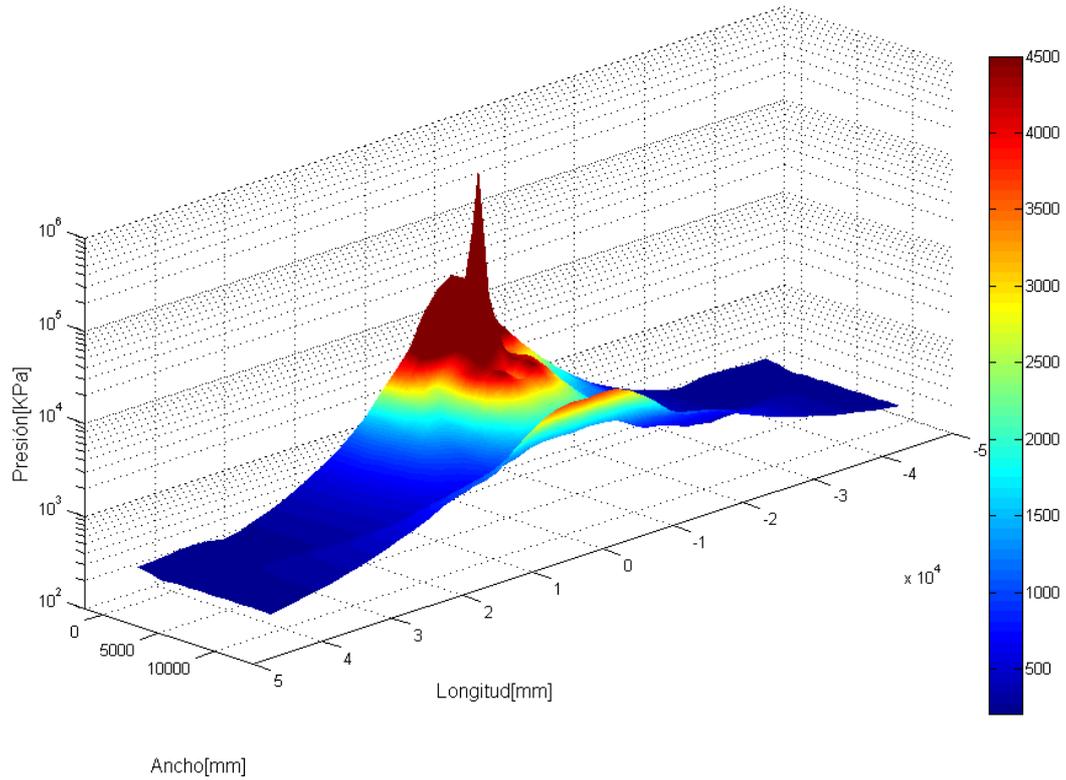
b) Ejemplo de modelo no confinado

Figura 8. Ejemplo de modelos confinado y no confinado, Calle de 20m.

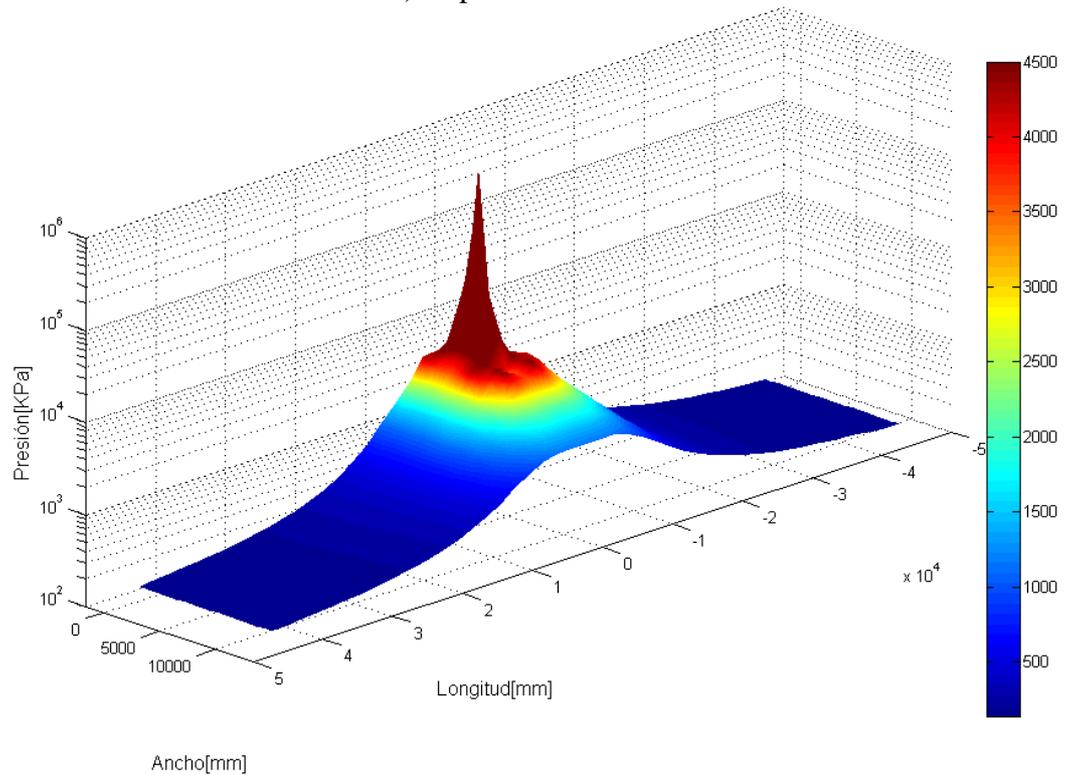
En todos los casos los puntos de control fueron ubicados en un plano horizontal a 1m sobre el nivel del suelo.

## 5 RESULTADOS

Se obtuvo la historia de presiones para cada uno de los modelos. A modo de ejemplo, se presentan algunos resultados en la [Figura 9](#) y [Figura 10](#).



a) Explosión confinada



b) Explosión no confinada

Figura 9. Sobrepresiones máximas registradas a un metro sobre el nivel del suelo, Calle de 12m y TNT 1000kg.

Como puede verse en la Figura 9, existe una amplificación de sobrepresiones máximas registradas entre los modelos con paredes y sin paredes debidas al efecto de confinamiento.

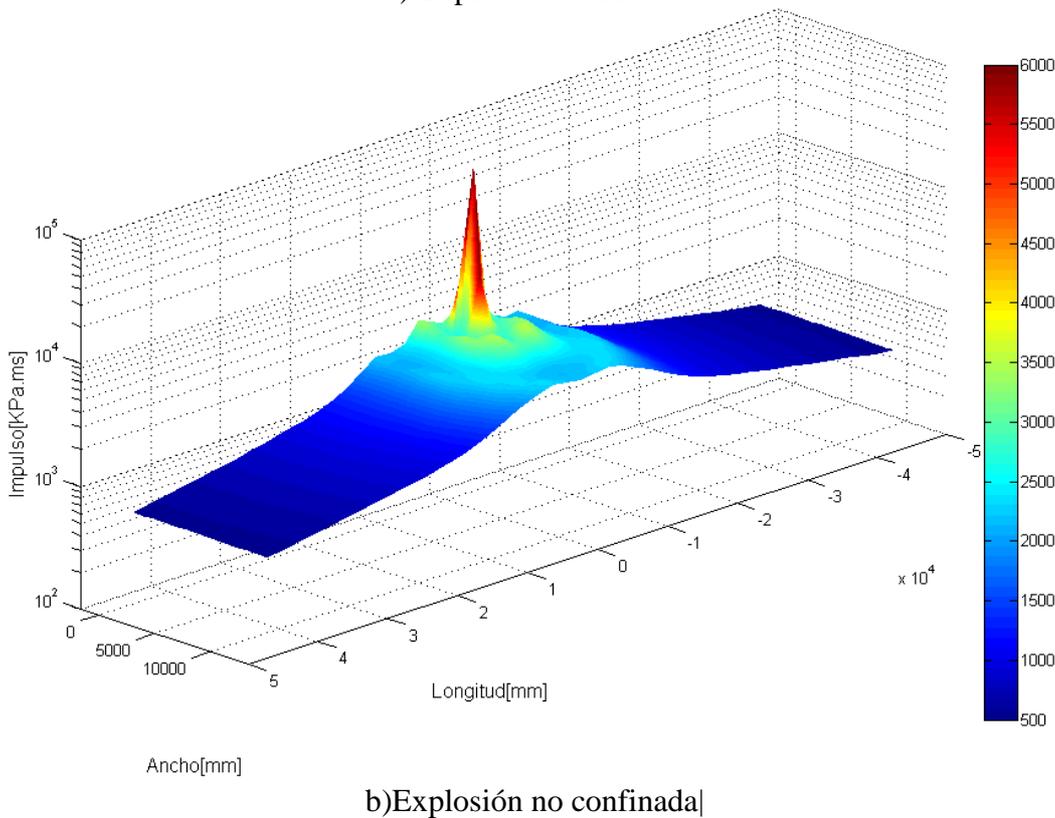
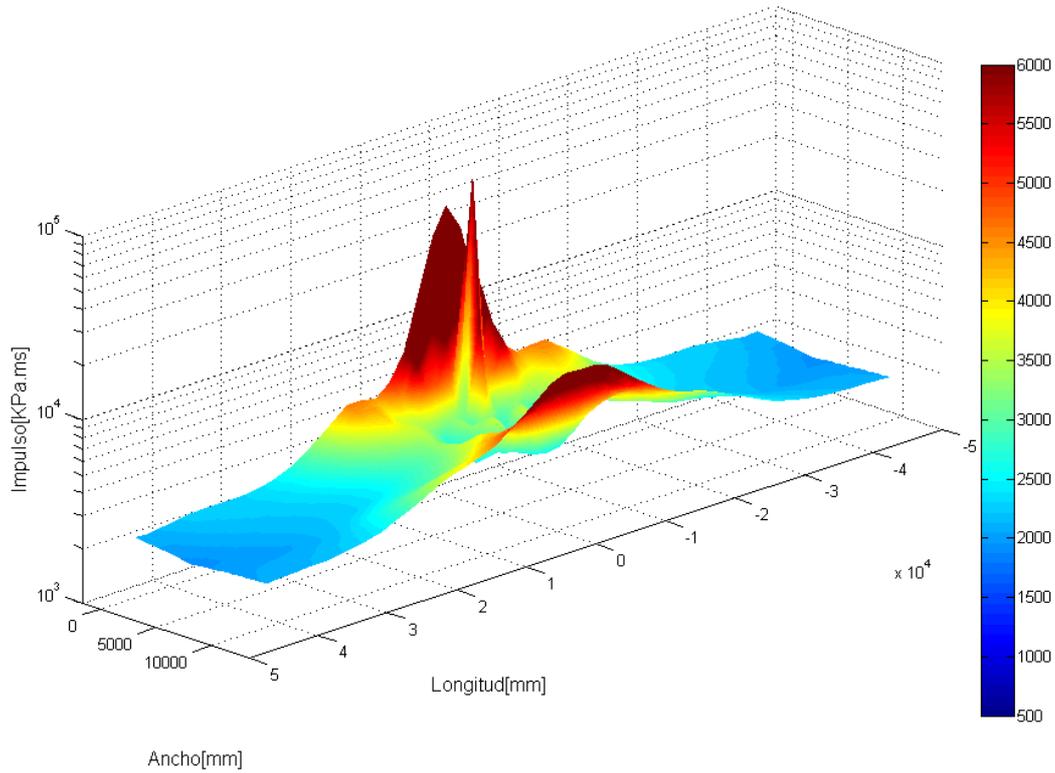


Figura 10. Impulsos máximos registrados a un metro sobre el nivel del suelo, Calle de 12m y TNT 1000kg.

En la Figura 10 se grafica el impulso máximo registrado para la misma explosión. El efecto de confinamiento también se ve reflejado en el valor del impulso.

## 5.1 Amplificación de Presiones e Impulsos

Con el objetivo de visualizar claramente el fenómeno de confinamiento se presentan gráficos de amplificación (Figuras 11 a 16) donde se grafica: PC/PSC y IC/ISC, donde PC es la sobrepresión máxima registrada en explosión confinada, PSC es la sobrepresión máxima registrada en la explosión equivalente no confinada, y de la misma manera se hace con los impulsos. Un valor de 1 en estos gráficos significa que la presión o impulso registrados en ese punto tienen igual magnitud en la explosión confinada y no confinada, lo cual indica que en esa zona no se produce confinamiento.

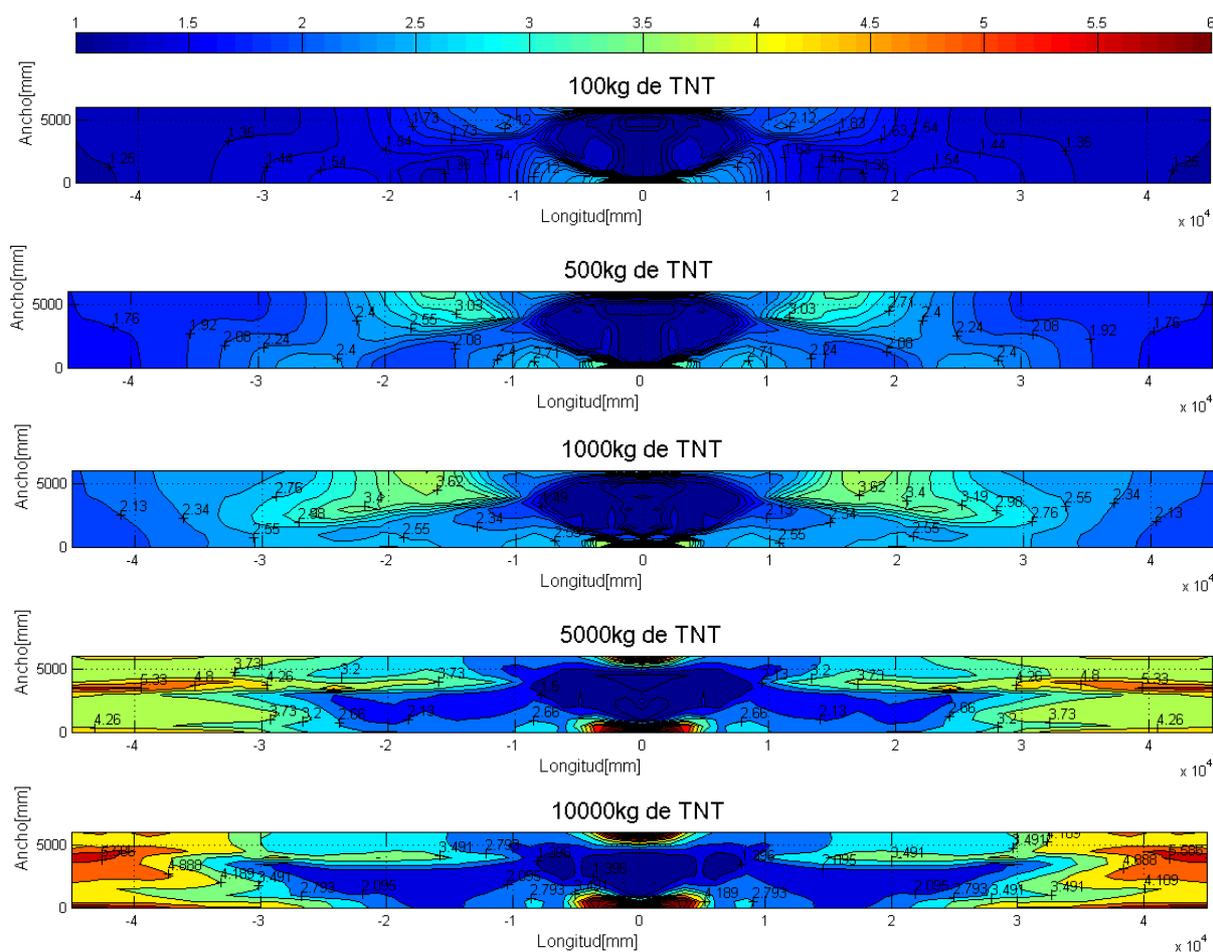


Figura 11. Amplificación de Sobrepresiones en calle de 6m

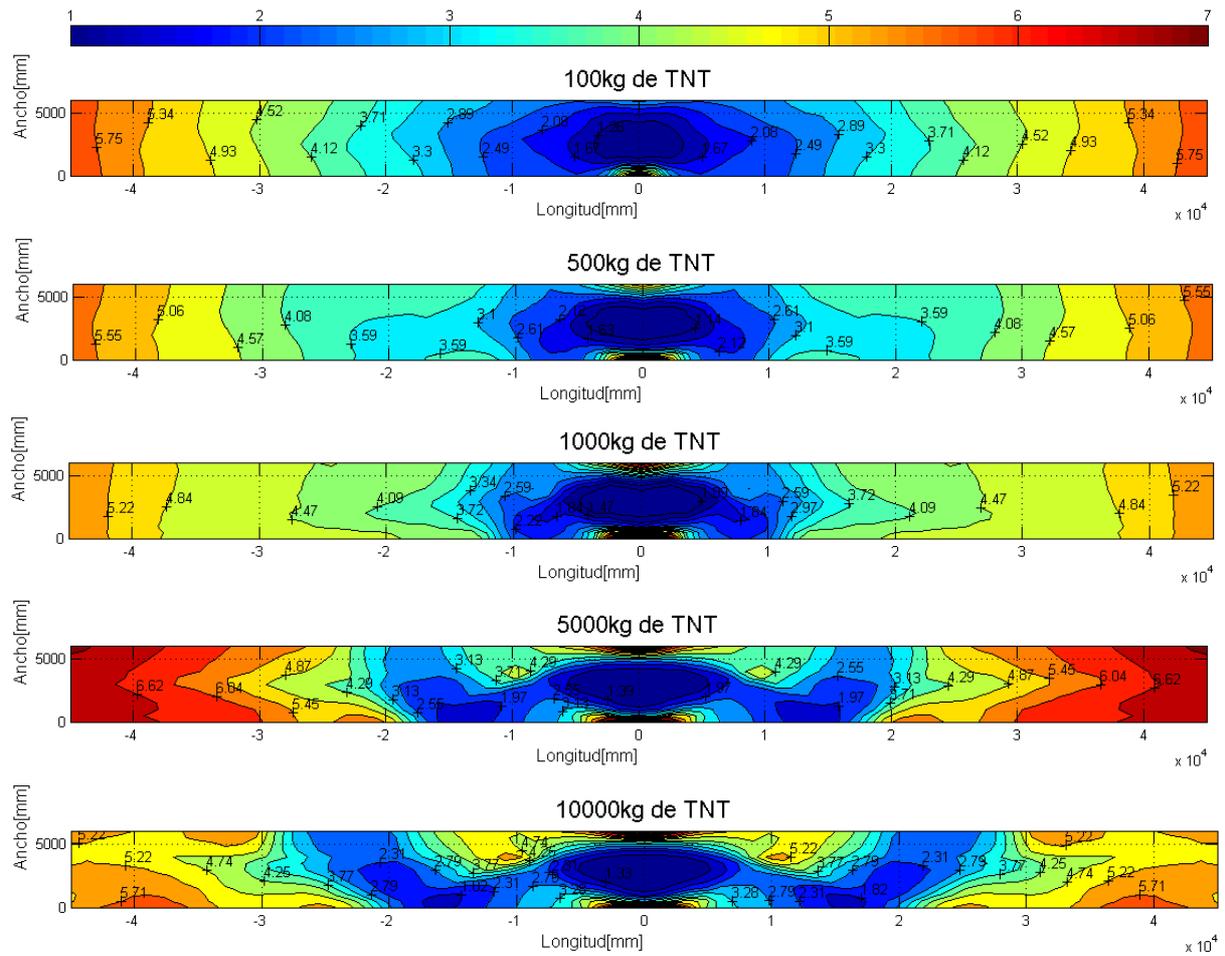


Figura 12. Amplificación de Impulsos máximos registrados en calle de 6m

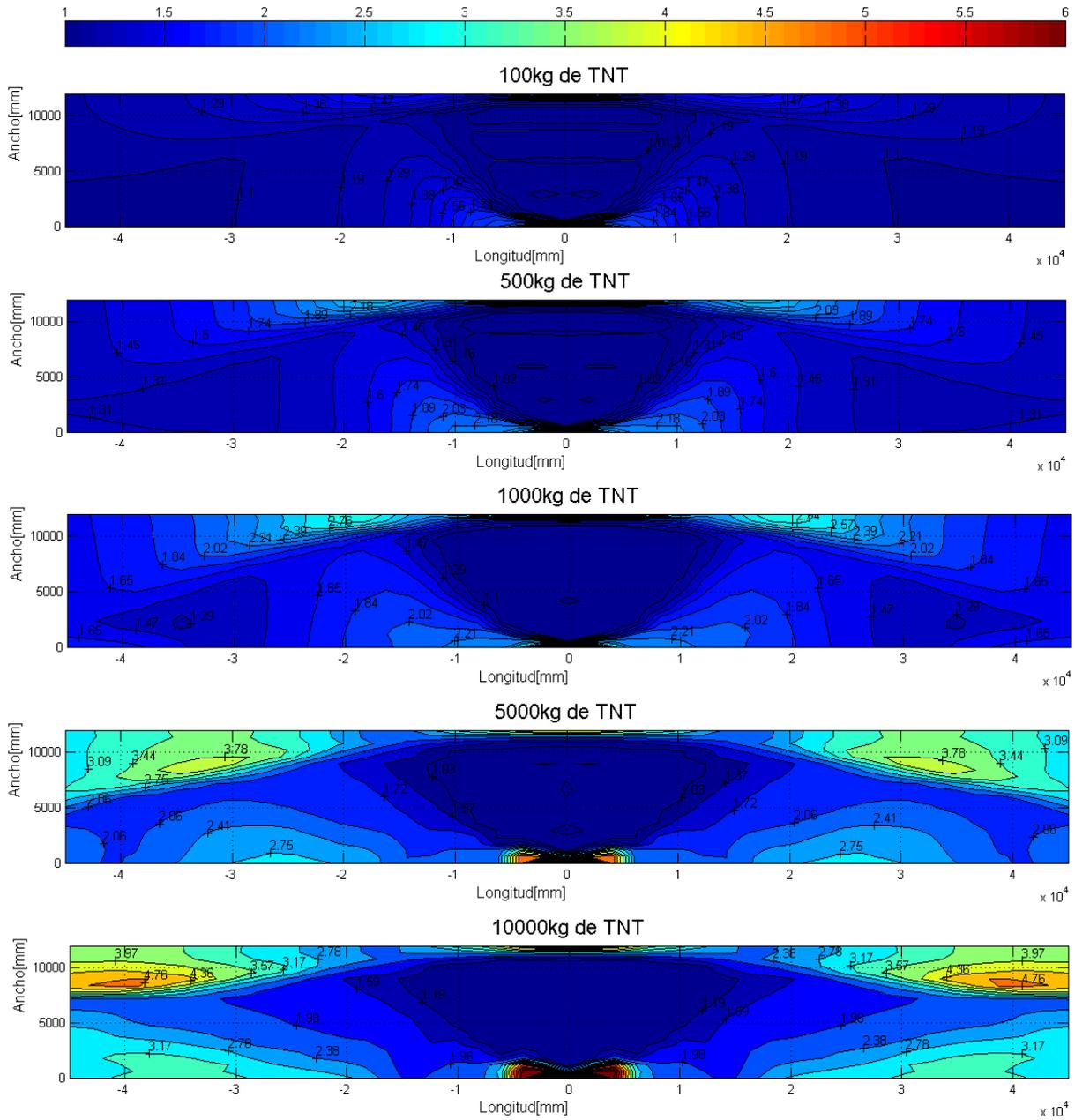


Figura 13. Amplificación de Sobrepresiones en Calle de 12m.

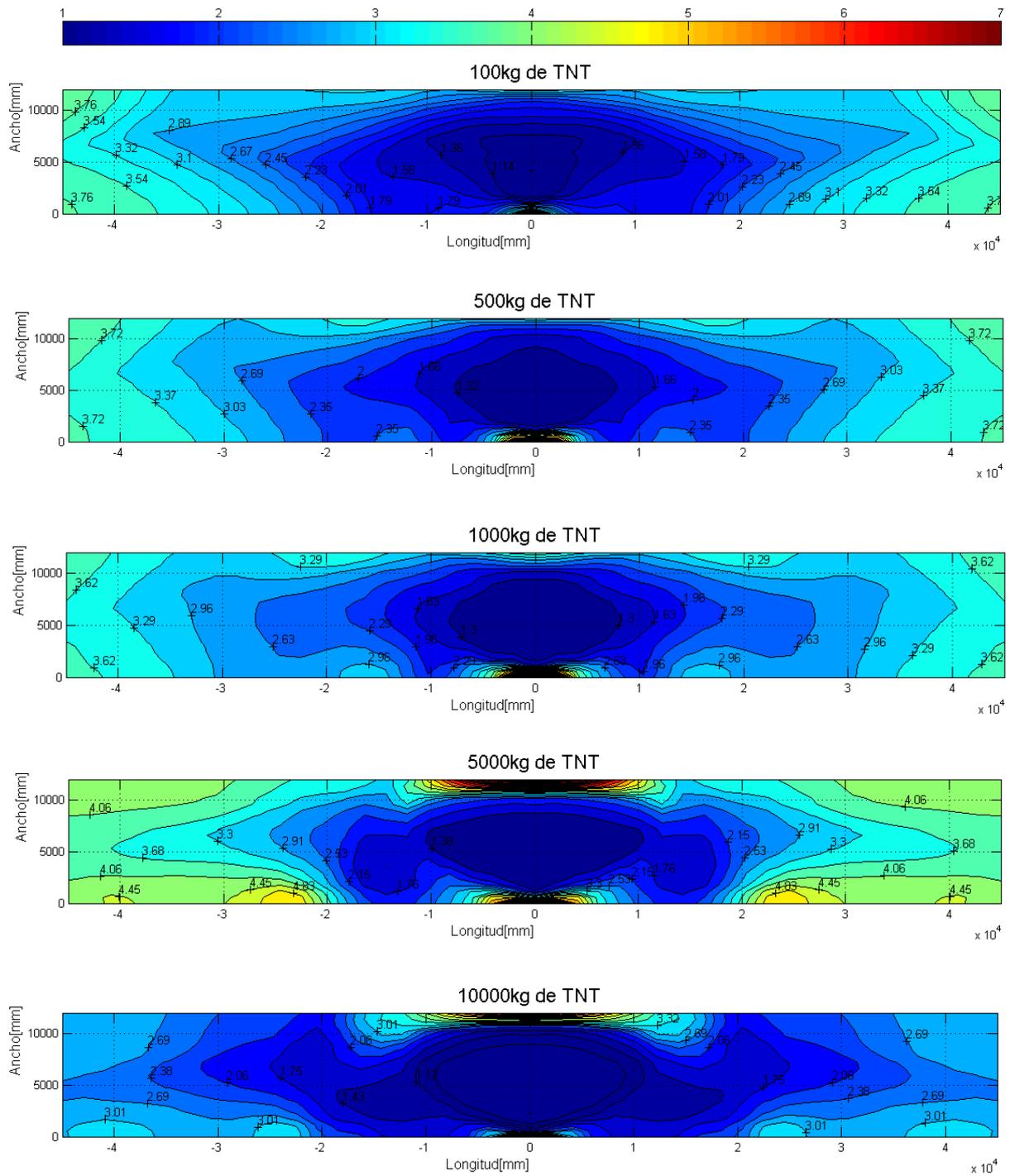


Figura 14. Amplificación de Impulsos máximos registrados en Calle de 12m

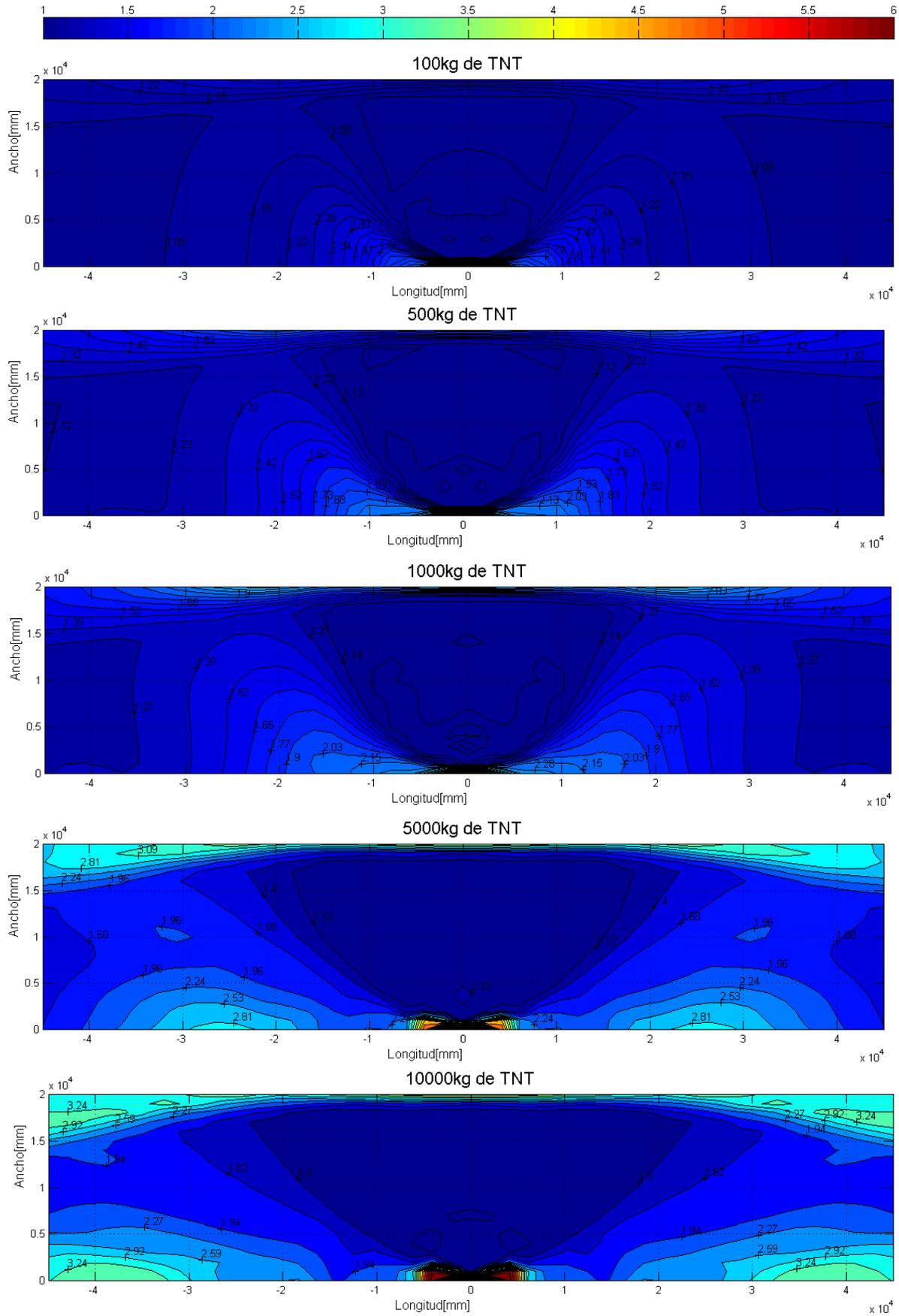


Figura 15. Amplificación de Sobrepresiones en Calle de 20m.

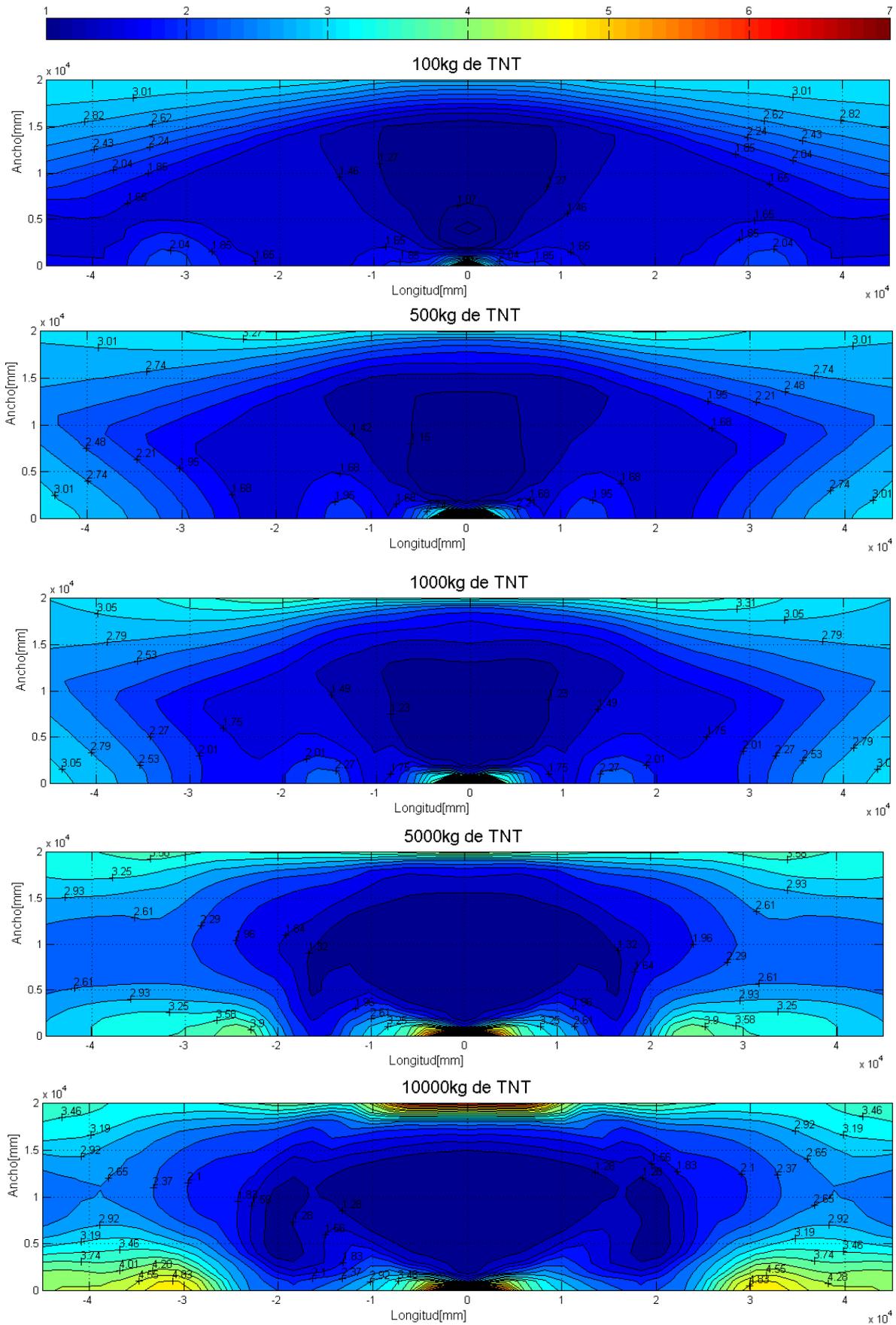


Figura 16. Amplificación de Impulsos máximos registrados en calle de 20m.

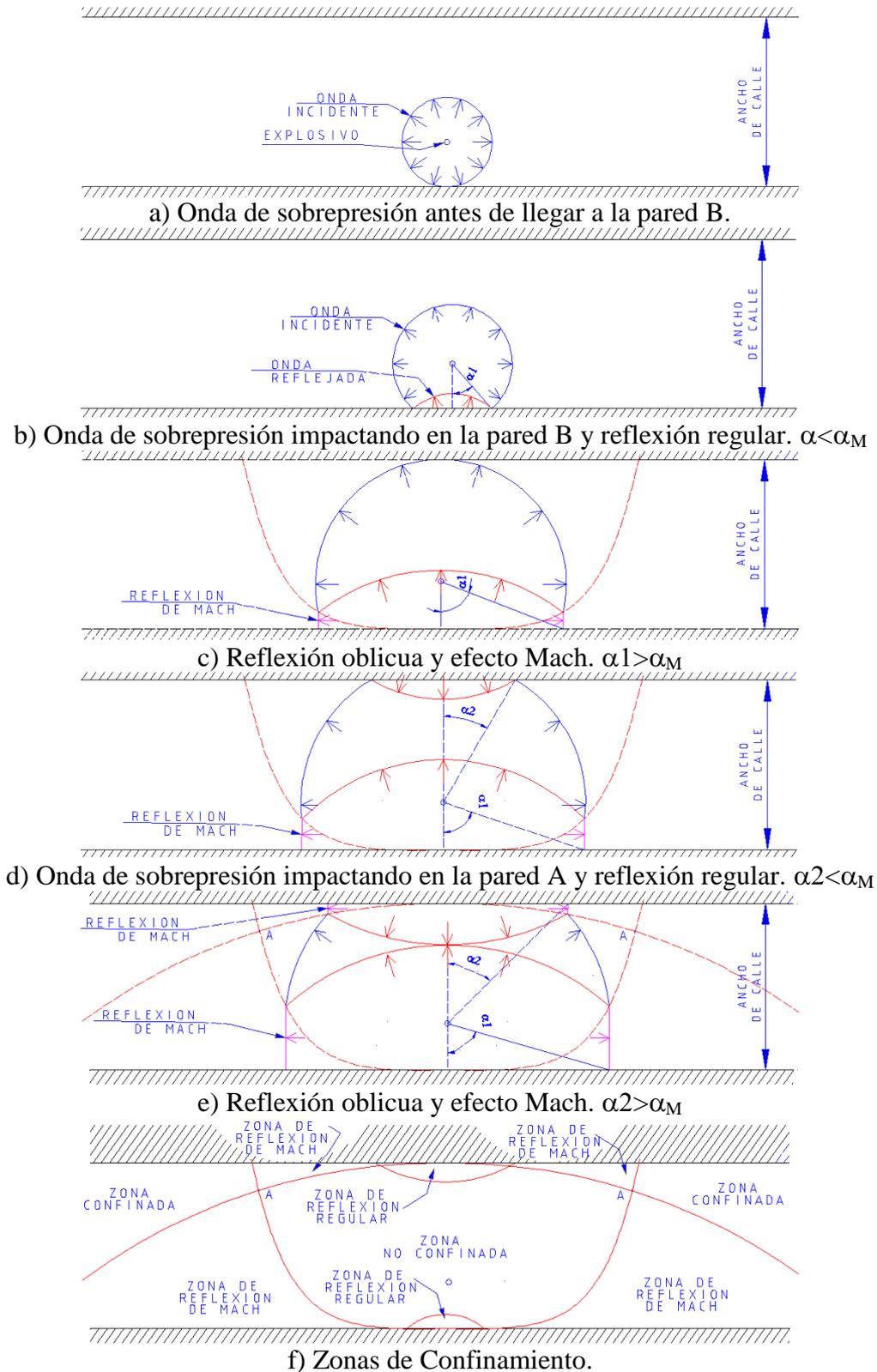


Figura 17. Desarrollo de las ondas de sobrepresión, y definición de las zonas de confinamiento.

Puede verse en las Figuras 11, 13 y 15, que existe una zona cercana al explosivo en la cual el efecto de amplificación de sobrepresión es despreciable, en esta zona las ondas de sobrepresión incidentes y reflejadas no se superponen. Las dimensiones y forma de esta zona

son poco sensibles a la carga del explosivo, y dependen más del ancho de la calle y ubicación de dicho explosivo (ver Figura 17).

Si se compara para una misma carga de explosivo en dos anchos de calle diferentes, se puede apreciar como los valores de amplificación son mayores en el ancho de calle menor, lo cual es razonable.

En la cercanía con las superficies rígidas, se ve claramente como se produce un efecto de reflexión normal, (ver Figura 17) y a medida la onda de sobrepresión se aleja del centro de la calle, se convierte gradualmente en una reflexión oblicua, conforme va aumentando el ángulo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , entre la normal a la superficie de las paredes y la dirección de la onda incidente.

El efecto de reflexión normal no tiene mayor importancia en el efecto de confinamiento de la explosión en la calle, ya que se desarrolla en una zona muy reducida, frente a las fachadas de los edificios, por el contrario el efecto de la reflexión oblicua, genera un efecto de aumento de sobrepresión (respecto a la explosión no confinada) en una superficie más extensa, en esta zona se desarrolla la reflexión de Mach (Figura 17)

Una vez que los frentes de onda alcanzan el punto A (Figura 17) entran en una zona de confinamiento donde se producen efectos de combinación de ondas, y múltiples reflexiones con los muros, pero de menor intensidad.

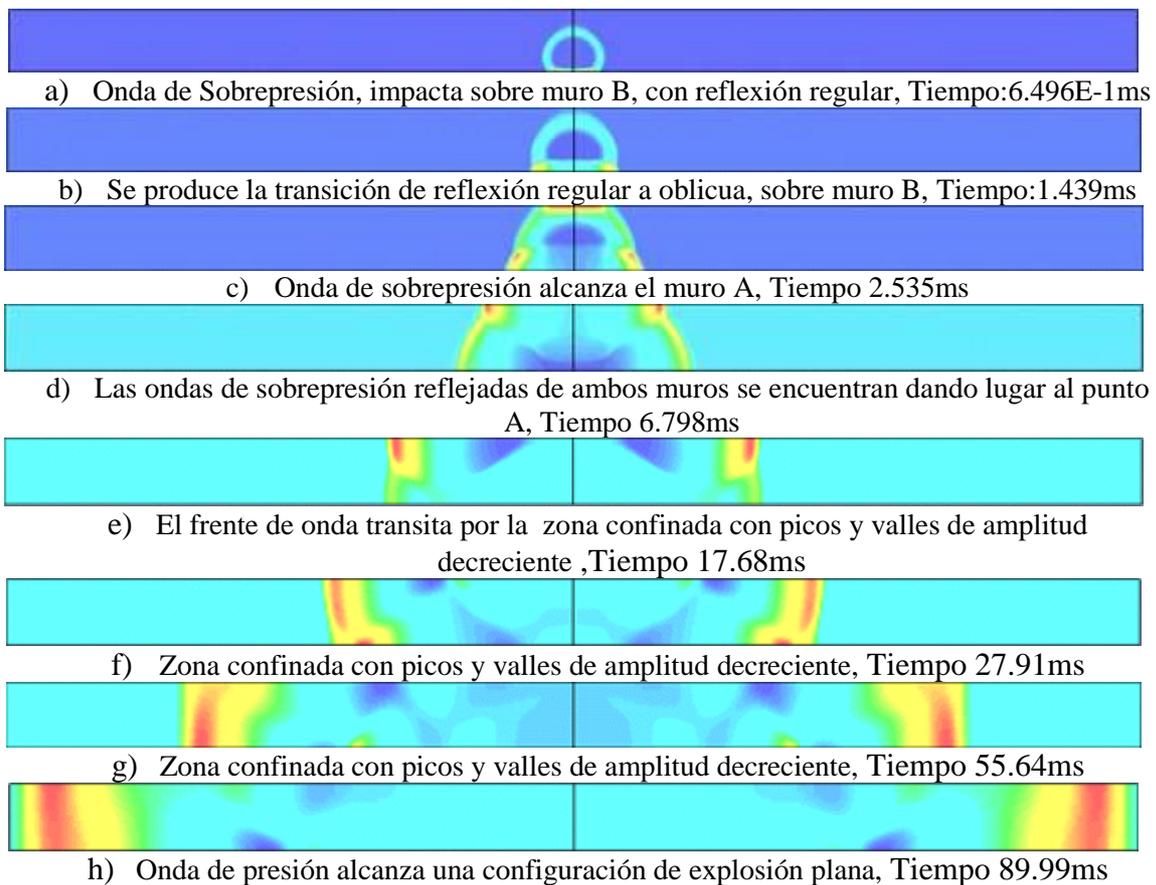


Figura 18. Desarrollo de las ondas de sobrepresión, calle de 6m con 100kg de TNT.

Si la calle es lo suficientemente larga, en relación a su ancho, los picos y valles de sobrepresión van perdiendo amplitud, llegando a una configuración de explosión plana, la cual tiende a decaer más lentamente que la explosión no confinada equivalente, por lo tanto se ve un efecto de “amplificación” por este motivo. Este efecto es apreciable en la calle de 6m de ancho, para las cargas de 100, 500 y hasta 1000kg, (ver Figura 11). Como ejemplo se muestra en la Figura 18, el desarrollo en el tiempo de las ondas de sobrepresión para la calle de 6m,

con 100kg de TNT. A medida que se incrementa la carga de explosivo, se requiere mayor distancia para alcanzar este estado, es por eso que para cargas de más de 5000kg, no se aprecia este fenómeno. De la misma manera a medida que se aumenta el ancho de la calle, también aumentan las distancias para alcanzar cada una de las zonas de confinamiento mostradas en la [Figura 17](#).

Con respecto al efecto que tiene el confinamiento en el impulso, su interpretación no es tan simple, ya que al calcularse el impulso como la integral de la sobrepresión en el tiempo, las ondas de sobrepresión que inciden en un punto determinado en tiempos diferentes, tienen un efecto acumulativo, y hacen que la zona no confinada desde el punto de vista del impulso sea mucho menor. A pesar de esto, se puede ver en los gráficos de las [Figuras 12, 14 y 16](#), como los efectos de confinamiento en el impulso son similares a los de presión. Al igual que en el caso de la sobrepresión, se puede observar en estos gráficos una mayor amplificación en las mismas zonas donde se produce el efecto de reflexión normal, la zona de reflexión de Mach, y el punto A.

También se puede apreciar que la amplificación de los impulsos es mayor que la de las presiones, y esta diferencia es mayor a medida que nos alejamos del explosivo.

## 6 CONCLUSIONES

El estudio paramétrico de explosiones en ambientes urbanos, realizado en este trabajo, permite un mejor entendimiento del efecto del confinamiento en parámetros de diseño como las sobrepresiones e impulsos.

Se determinaron las zonas de confinamiento para calles de anchos típicos y cantidades de explosivo que cubren los rangos de ataques terroristas en configuraciones urbanas.

El efecto de confinamiento a nivel de sobrepresiones máximas registradas se genera principalmente por la suma de ondas de presión incidentes y reflejadas, que se encuentran en el mismo punto y al mismo tiempo.

El impulso al calcularse como la integral de la presión en el tiempo hace que ondas de presión reflejadas que inciden en un tiempo posterior al paso de la onda de presión incidente, sumen al impulso acumulado final, haciendo que las zonas de confinamiento despreciables sean mucho más reducidas.

Se puede observar que las explosiones parcialmente confinadas en ambientes urbanos tienden, si la longitud de la calle es lo suficiente mente larga, a adoptar una configuración de explosión plana, con una ley de decaimiento menor que la explosión libre equivalente, pero a medida que se incrementa la cantidad de explosivo se necesita mayor distancia para alcanzar este estado.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico de CONICET y SECTyP (Universidad Nacional de Cuyo).

## REFERENCIAS

- Alia, a., & Souli, M. (2006). High explosive simulation using multi-material formulations. *Applied Thermal Engineering*, 26(10), 1032-1042.
- Alhussan, K., Smetannikov, A. S., Stankevich, Y. a., Stepanov, K. L., & Zhdanok, S. a. (2011). Computer modeling the hydrodynamics of explosion above a surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7-8), 1608-1614.
- Alhussan, K., Stepanov, K. L., Stankevich, Y. A., Smetannikov, A. S., & Zhdanok, S. A. (2011). Hydrodynamics of the initial phase of explosion. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 1627–1640

- Ambrosini, D., Luccioni, B., Jacinto, A., & Danesi, R. (2005). Location and mass of explosive from structural damage. *Engineering Structures*, 27(2), 167-176.
- ANSYS-AUTODYN. (2009) Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, Version 12.1.0, *User's Manual*. Century Dynamics Inc.
- Baker W. Cox P., Westine P., Kulesz J., y Strehlow R. (1983). Explosion Hazards and Evaluation. *Elsevier, Amsterdam*.
- Benselama, A. M., William-Louis, M. J.-P., & Monnoyer, F. (2009). A 1D–3D mixed method for the numerical simulation of blast waves in confined geometries. *Journal of Computational Physics*, 228(18), 6796-6810
- Benselama, A. M., William-Louis, M. J.-P., & Monnoyer, F. (2010). Prediction of blast wave effects on a developed site. *International Journal of Impact Engineering*, 37(4), 385-396.
- Børvik, T., Hanssen, a. G., Langseth, M., & Olovsson, L. (2009). Response of structures to planar blast loads – A finite element engineering approach. *Computers & Structures*, 87(9-10), 507-520.
- Codina, R., Ambrosini, D. (2012). Determinación de efectos de confinamiento en ambientes urbanos sometidos a explosiones mediante estudio numerico. *XXXV Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Rio de Janeiro* (1-15)
- FEMA 426 (2003). Reference Manual to Mitigate Potential terrorist attacks against Buildings. *U.S. Department of Homeland Security*
- Lee E. y Tarver C(1980). Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Physics of Fluids*, 23(12):2362–2372.
- Lu, Y., Wang, Z., & Chong, K. (2005). A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(4), 275-288.
- Luccioni, B., Ambrosini R.D., R.F., Danesi a,d .,(2004). Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, 26(1), 63-71.
- Luccioni, B., Ambrosini, D., & Danesi, R. (2006). Blast load assessment using hydrocodes. *Engineering Structures*, 28(12), 1736-1744.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. *EJSE Special Issue: Loading on Structures* (2007)
- Remennikov, a, & Rose, T. (2005). Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers & Structures*, 83(27), 2197-2205.
- Rigas, F., & Sklavounos, S. (2005). Experimentally validated 3-D simulation of shock waves generated by dense explosives in confined complex geometries. *Journal of hazardous materials*, 121(1-3), 23-30.
- Silvestrini, M., Genova, B., & Leon Trujillo, F. J. (2009). Energy concentration factor. A simple concept for the prediction of blast propagation in partially confined geometries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 449-454.
- Sorensen, A., & McGill, W. L. (2011). What to look for in the aftermath of an explosion? A review of blast scene damage observables. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 836-845.
- UFC 3-340-02. (2008). Structures to Resist the Effects of Accidental Exploptions, *U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*.
- Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., & Chong, K. (2005). A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. *Computers & Structures*, 83(4-5), 339-356.