

REFLEXIÓN DE ONDAS DE PRESIÓN EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS SOMETIDOS A EXPLOSIONES EXTERNAS

BLAST WAVES REFLECTION INSIDE OF BUILDINGS EXPOSED TO EXTERNAL EXPLOSIONS

Ramón H. Codina^a y Daniel Ambrosini^b

^a CONICET, Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería UNCuyo, Argentina.,
ramonhcodina@gmail.com

^b CONICET, Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería UNCuyo, Argentina,
dambrosini@uncu.edu.ar

Palabras clave: Ambientes Urbanos, Explosiones, Confinamiento, Reflexión de Ondas.

Resumen. En los últimos años, ataques terroristas en todo el mundo, han demostrado la necesidad de estudiar el efecto de explosiones en ambientes urbanos. En relación con el diseño de estructuras sometidas a explosiones subsisten aún muchos interrogantes en la literatura técnica. Muchos estudios de diferentes países permanecen “clasificados” sin posibilidad de acceso por parte de investigadores y diseñadores de otros países. En el presente trabajo, se realizó un estudio numérico-experimental en una construcción simple sometida a diferentes cargas explosivas externas. Se utilizan cargas explosivas equivalentes a 1 y 5 kg de TNT ubicadas a 1m sobre el suelo y a diferentes distancias de la construcción. Se obtienen registros de sobrepresión en distintos puntos de la estructura mediante el uso de sensores de presión colocados en el interior y exterior de la construcción. Se estudia el ingreso de las ondas de presión a través de las aberturas de edificaciones. Además se determinan en forma experimental y numérica, los efectos de múltiple reflexión que dichas ondas de presión causan en el interior. Los registros obtenidos permiten determinar efectos de confinamiento de onda en el interior de la edificación. También es de interés el estudio comparativo de técnicas de modelación explícita y métodos analíticos simplificados.

Keywords: *Urban Environment, Explosions, Confinement, blast wave Reflection.*

Abstract. In recent years, terrorist attacks around the world have demonstrated the need to study the effect of explosions in urban environments. In the design of structures subjected to explosions, many questions still remain in the technical literature. A lot of information remains "classified" without the possibility of access by researchers and designers. In this paper, a simple construction subject to different external explosive charges is studied with a numerical analysis based in experimental results. Charges equivalent to 1 and 5 kg of TNT at different distances were detonated. In the experimental test, overpressures are registered through sensors placed inside and outside the construction. The leakage of blast waves through the openings of buildings is studied. The records obtained allow to determine confinement effects inside the building. Also of interest is the comparative study of explicit modeling techniques and simplified analytical methods.

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas el efecto de las explosiones en las estructuras ha sido motivo de estudio científico. Las explosiones pueden ser intencionales como las debidas al terrorismo o no intencionales como en el caso de las producidas en accidentes industriales. En relación al terrorismo, centros urbanos en gran cantidad de países han sufrido ataques con diversas modalidades, coches bomba, ataques suicidas, y a través de dispositivos explosivos improvisados (IEDs). Por lo tanto, tiene importancia el estudio de explosiones en entornos urbanos con el fin de elaborar estrategias de mitigación de daño, sistemas de protección, (Goel and Matsagar, 2014), y también en la investigación de atentados, (van der Voort et al., 2015).

Existen diferentes herramientas analíticas y numéricas para el análisis de estructuras sometidas a explosiones. Las primeras se basan en fórmulas de origen empírico y en modelos analíticos simplificados. Estas herramientas se encuentran en manuales técnicos como [TM-5-855-1\(1986\)](#) o [UFC 3-340-02\(2008\)](#) y en programas como [CONWEP \(1988\)](#). Con el aumento de la capacidad computacional, métodos numéricos más rigurosos están siendo utilizados. Los mismos permiten el estudio de problemas con geometrías más complejas. Es de suma importancia el desarrollo de ensayos experimentales a fin de verificar tamaños de mallado y calibración de los materiales a fin de obtener resultados confiables.

El estudio de la reflexión de las ondas de presión sobre las construcciones, mediante ensayos experimentales y funciones semi-empíricas, pueden encontrarse en trabajos como [Smith et al. \(2003\)](#) o [Tyas et al. \(2011\)](#). Por otra parte también pueden encontrarse estudios numéricos en trabajos como [Wang & Remotigue \(2016\)](#) y [Rose et al. \(2006\)](#).

El ingreso de las ondas de presión por las aberturas de los edificios tiene importancia ya que muchas veces las ventanas y puertas fallan por el impacto de la explosión. Si bien las ondas de presión ingresantes son en general menos intensas que en el exterior, pueden tener una intensidad suficiente para causar daños debido a las múltiples reflexiones en el interior de las edificaciones y a la acumulación de presión ambiental conocida como “Pressure Buildup”. Este último efecto también conocido como presión de “filling”, depende esencialmente de el volumen de la edificación, áreas de las aberturas y la duración de la presión aplicada sobre la fachada, ([Esparza et al., 1975](#); [UFC 3-340-02, 2008](#)). Es importante poder desarrollar predicciones realistas de la presión interna a fin de mejorar diseños estructurales en el interior de las edificaciones, como por ejemplo en equipos, luminarias, conductos, etc. Estos elementos pueden desprenderse y fallar pudiendo ocasionar un peligro adicional para los ocupantes, [UFC 3-340-02 \(2008\)](#). [Ram et al.\(2016\)](#) usa modelos a escala para investigar como la presión e impulso impuesta en el frente de una estructura con diferentes configuraciones de tabiques internos afecta el desarrollo de la carga sobre una pared interior. Se observó que el valor máximo del impulso sobre la pared es independiente de la geometría interna. En el trabajo de [Luccioni et al. \(2004\)](#), se estudió para el edificio de la AMIA el efecto de las sobrepresiones, que produjeron el colapso. En el presente trabajo se analizan resultados experimentales presentados en [Codina & Ambrosini \(2017\)](#), y se realizan modelaciones numéricas utilizando [ANSYS AUTODYN \(2005\)](#).

2 ENSAYO EXPERIMENTAL

En el ensayo experimental se realizaron explosiones externas frente a una estructura simple de mampostería con una abertura en la pared frontal. En la [Tabla 1](#) se presenta un resumen de los ensayos realizados. Los ensayos T2 y T4 son iguales y permiten determinar el grado de repetitividad de los mismos, lo cual se analizó en [Codina & Ambrosini \(2017\)](#). La distancia

escalada “Z” fue determinada en orden de no exceder el rango de presión del sensor ($\pm 2,5$ psi). En todos los casos el explosivo se colocó a 1 m sobre el nivel del suelo.

Ensayo	Carga eq. W	Distancia “D”	$Z=D/W^{1/3}$	Angulo “ α ”
T1	1 kg de TNT	15 m	15,0 m/kg ^{1/3}	0°
T2	5 kg de TNT	25 m	14,6 m/kg ^{1/3}	0°
T3	5 kg de TNT	28,86 m	16,8 m/kg ^{1/3}	30°
T4	5 kg de TNT	25 m	14,6 m/kg ^{1/3}	0°

Tabla 1: Resumen de ensayos realizados.

En la Figura 1 se observa la estructura de mampostería construida para los ensayos experimentales y un esquema en planta de la ubicación de los explosivos para los ensayos realizados. En la Figura 2 se presenta la ubicación de los sensores de presión dentro y fuera de la construcción y las dimensiones de la estructura.

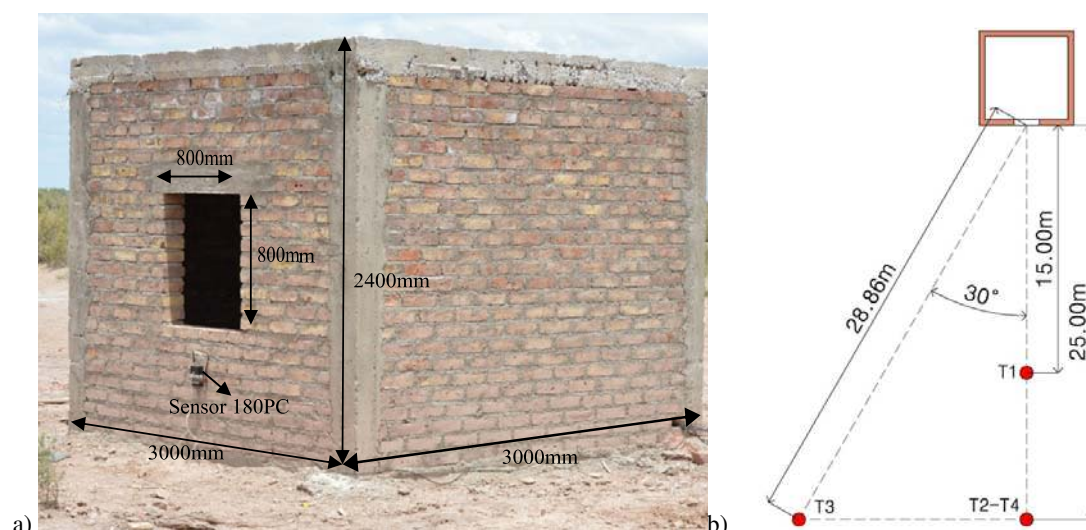


Figura 1. a) Estructura de mampostería con una abertura. b) Ubicación en planta de los explosivos

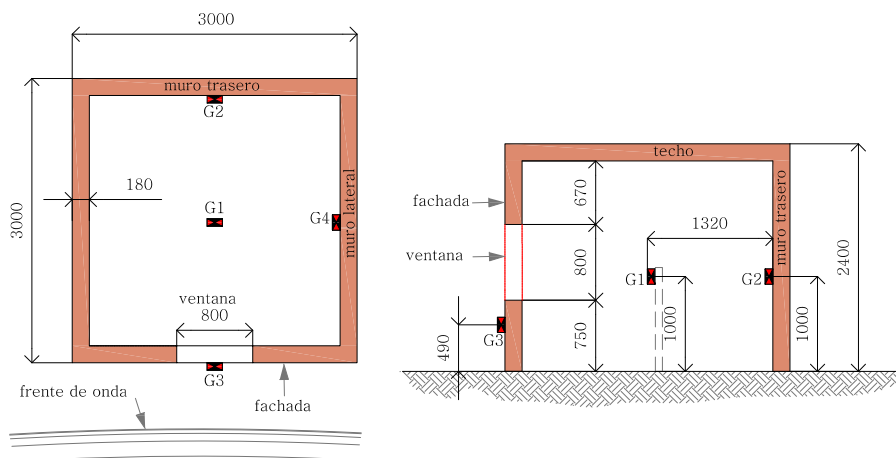


Figura 2. Ubicación de sensores de presión en la construcción.

Se utilizó un explosivo de uso comercial, Gelamón VF-65. El mismo tiene una equivalencia en masa de TNT de un 65%, según datos del fabricante. Las propiedades del explosivo fueron presentadas en [Codina et al. \(2016\)](#), donde se verificó la equivalencia en TNT.

2.1 Resultados experimentales

Las presiones máximas registradas en los ensayos se presentan en [Tabla 2](#). Se puede observar que la máxima presión reflejada en la fachada (sensor G3) es entre dos y tres veces mayor que en el interior de la construcción (sensores G1, G2 y G4). La máxima sobrepresión en el centro de la construcción, sensor G1, fue en promedio un 44% de la del sensor G3. Sobre la pared trasera, sensor G2, se registró una sobrepresión máxima de 36% de la registrada en la fachada (promedio de los 4 ensayos presentados). Finalmente en la pared lateral se registraron en promedio presiones de 29% de intensidad respecto de la fachada.

Ensayo	G1	G2	G3	G4
1	7,68	5,26	14,54	3,38
2	9,05	6,45	18,41	4,78
3	4,23	5,71	14,83	6,05
4	9,60	6,77	19,69	5,19

Tabla 2: Sobrepresiones máximas medidas [kPa].

Integrando los registros de sobrepresión se obtuvieron los de impulso. En la [Tabla 3](#), se resumen los valores de impulso máximo alcanzados en los distintos sensores. Se observa una reducción en los impulsos en el interior de la construcción al compararlos con los impulsos máximos en la fachada (sensor G3), pero en este caso, la reducción es menor que para las sobrepresiones. Se puede observar que en promedio se redujo el impulso en el sensor G1 a un 59%, en el sensor G2, a un 63%, y en el sensor G4 a un 58%.

Ensayo	G1	G2	G3	G4
1	10,74	14,28	27,80	9,98
2	32,31	33,57	51,64	32,43
3	25,79	25,63	36,57	25,31
4	35,25	35,99	54,02	35,27

Tabla 3: Impulsos máximos medidos [kPa.ms].

3 ESTUDIO NUMÉRICO

Se utilizó el hidrocódigo [ANSYS AUTODYN \(2005\)](#), para simular en forma numérica los ensayos realizados experimentalmente. El explosivo fue modelado como TNT, con la EOS Jones-Wilkins-Lee (JWL) usando los parámetros por defecto de la librería de AUTODYN. El aire se consideró como un gas ideal con una presión ambiente de 101,75 kPa y una temperatura de 15 °C compatibles con las registradas durante el ensayo experimental. En las simulaciones, la estructura y suelo fueron representados como rígidos.

En los modelos se colocaron condiciones de borde del tipo “flow-out”, las cuales permiten en forma aproximada que las ondas de la explosión atraviesen el borde del modelo sin generar reflexión de ondas. Las dimensiones del modelo quedan definidas en función del tiempo en que se desea obtener resultados sin influencia del error propio de la condición de borde, ya que el error que la misma genera viaja a la velocidad del sonido del aire.

Como es habitual se utilizó la técnica de remapeo para desarrollar 4 etapas de la explosión teniendo en cuenta condiciones de simetría. En la [Tabla 4](#) se presenta un resumen de las distintas etapas de la modelación.

	Etapas en 2D			Etapa en 3D
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Malla	2D Euler MM	2D Euler FCT	2D Euler FCT	3D Euler FCT
Celda	2,5mm	5mm	10mm	100, 50 y 25mm
Descripción	<i>Detonación del explosivo y desarrollo de la explosión hasta antes de llegar al suelo.</i>	<i>Desarrollo de la explosión 2D en un espacio de 5x3m, con reflexión en suelo rígido</i>	<i>Desarrollo de la explosión 2D en un espacio de 15x15m o 25x25m, con reflexión en suelo rígido</i>	<i>Interacción con la construcción, se pierde simetría axial.</i>

Tabla 4 Resumen de las 4 etapas de modelación.

En la [Figura 3](#) se presenta el modelo 3D utilizado para el estudio numérico del ensayo T1. La malla abarca un espacio de 11,3 m x 6 m x 7 m, lo cual permite mapear el campo de presión frente a la construcción antes del impacto contra la fachada. Con las dimensiones adoptadas, se capta tanto la fase positiva como negativa de la onda de presión y se logra obtener aproximadamente 16 ms de historia de sobrepresión en el sensor G3 sin error de la condición de contorno, y hasta 27 ms de registro sin error en el sensor G2.

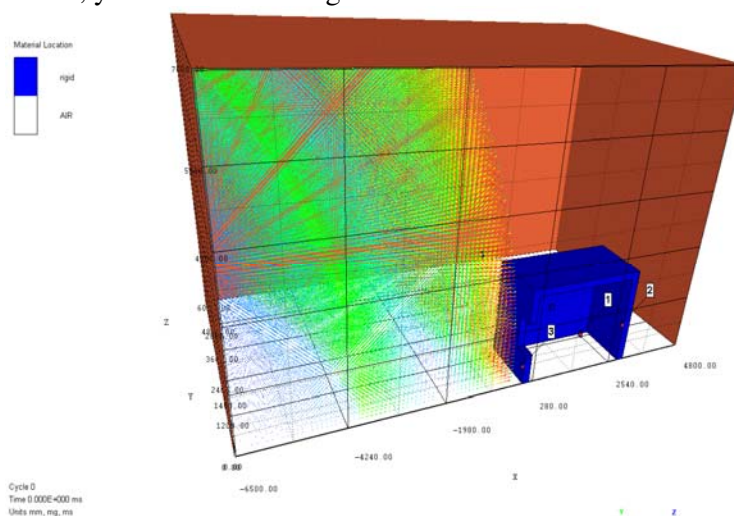


Figura 3 Modelo 3D de la etapa 4 para el ensayo T1.

En la [Figura 4](#) se observa la representación numérica de cómo la sobrepresión de la explosión del ensayo T1 ingresa por la abertura.

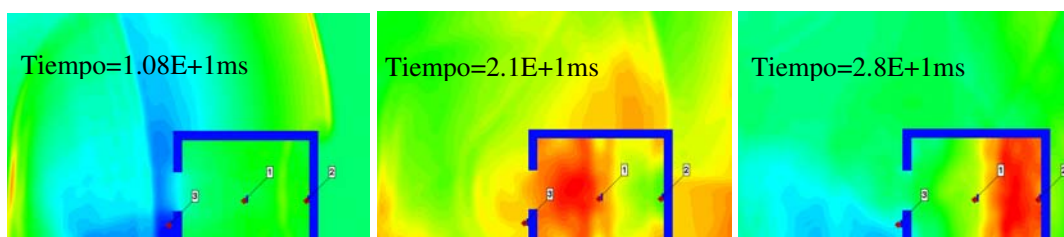


Figura 4 Propagación de la onda de presión en el interior de la edificación.

El modelo 3D se realizó con tres tamaños de elemento diferentes. En la [Figura 5.a\)](#) se presentan las historias de sobrepresión para diferentes tamaños de celda, y se comparan con el registro experimental del ensayo T1, medido en el sensor G3 (sobre la fachada). Como puede observarse en el sensor G3, no se logra una mejora significativa en el ajuste numérico experimental al reducir el tamaño de malla. El modelo no logra captar el pico de sobrepresión con exactitud aunque si se logra un ajuste aproximado la fase positiva y negativa de la onda de presión y de los tiempos de duración de ambas fases. Se observa que un mallado de 100 mm es adecuado para reproducir registros de sobrepresión en el exterior de la construcción dentro de las limitaciones del método, lo cual concuerda con lo observado en [Luccioni et al. \(2006\)](#). Por otra parte, en la [Figura 5.b\)](#), se presentan los registros de sobrepresión en el sensor G2. En este caso, es necesario un mallado más fino para ajustar los valores experimentales. El mallado de 25 mm logra una mejora en la representación del fenómeno aunque no alcanza a captar todos los picos de sobrepresión. Por otra parte, este tamaño de celda logra reproducir en forma aproximada, la historia de la onda de presión. Finalmente se optó por utilizar el tamaño de malla de 25 mm, con el cual se logra una buena relación costo computacional - precisión con 30.374.400 celdas y poco más de 27 horas de cálculo de una PC con procesador I7 y 32 GB de memoria RAM.

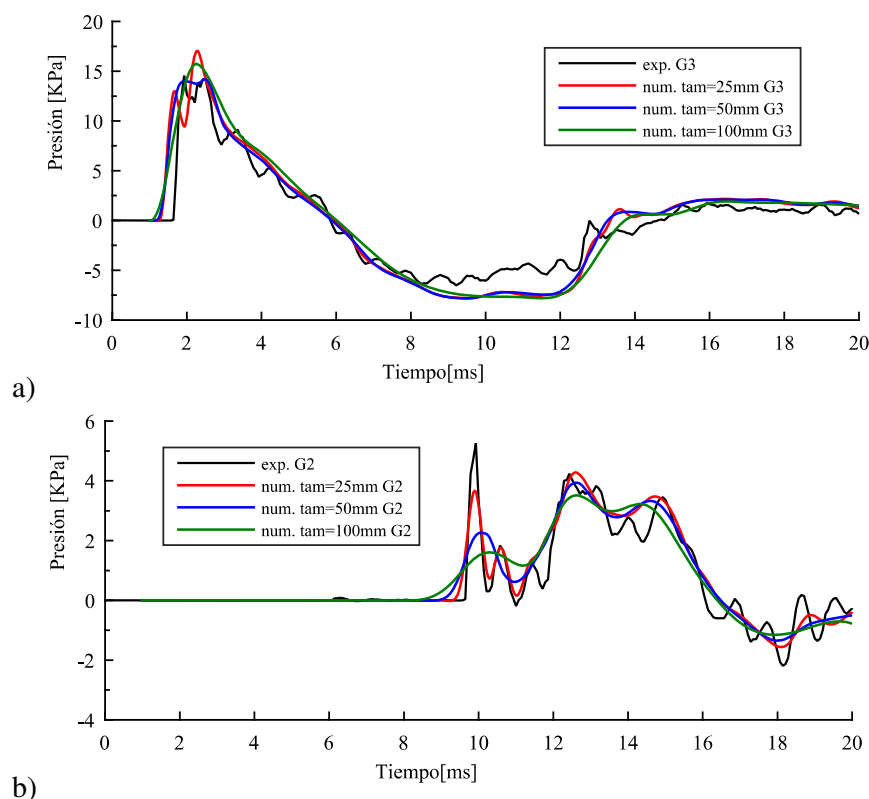


Figura 5 Historias de sobrepresión obtenidas con diferentes tamaños de celda.

3.1 Resultados numéricos y ajuste con resultados experimentales

En la [Figura 6](#) se presenta la comparación de los registros experimentales del ensayo T1 con los resultados numéricos obtenidos con un tamaño de celda de 25 mm.

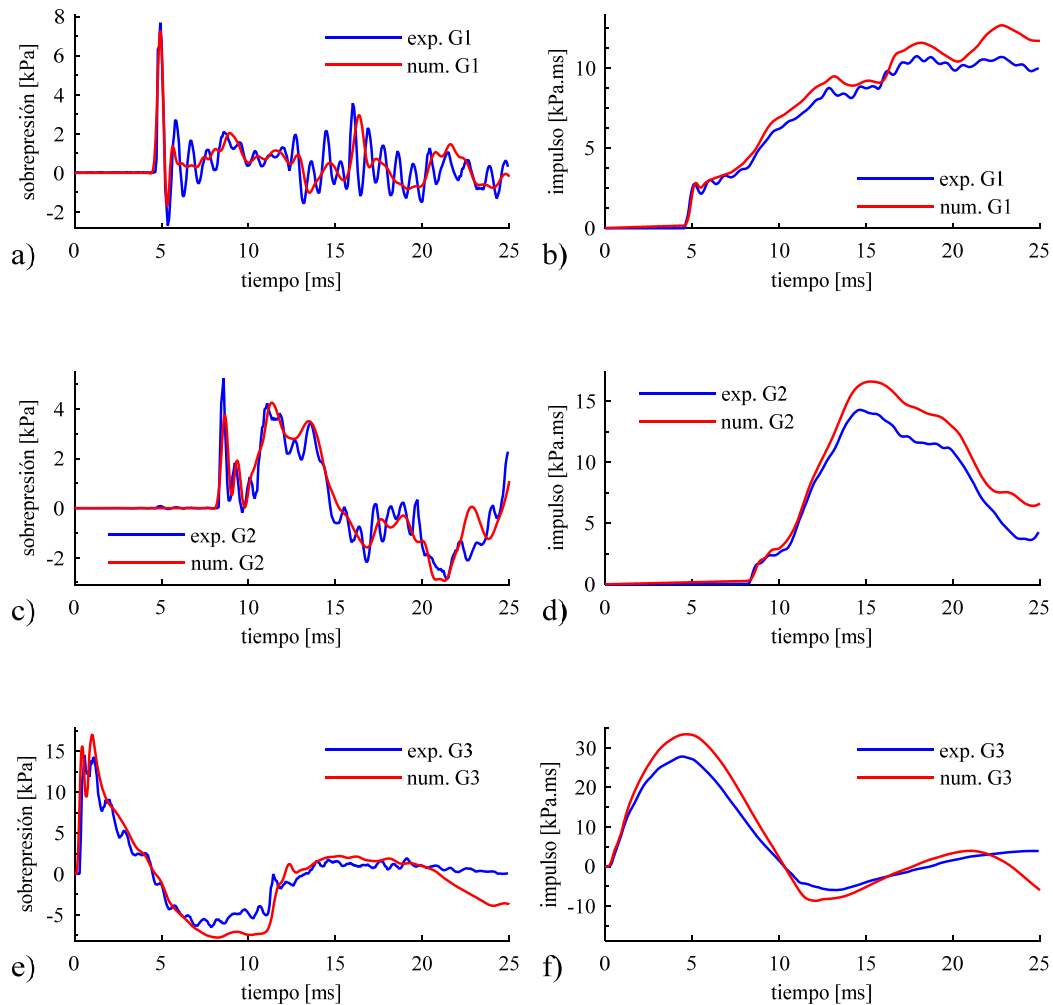


Figura 6 Comparación numérico-experimental, ensayo T1, sobrepresiones e impulsos.

Se observa que el modelo numérico se ajusta en forma aproximada a los registros experimentales de sobrepresión e impulso. Se observa en la [Figura 6.e](#)) que la sobrepresión del modelo experimental cae gradualmente luego de los 20 ms, esto se debe a la condición de borde “flow-out” que arriba al sensor en ese tiempo. Se observa además que AUTODYN entrega valores de sobrepresión negativa mayores a los observados en el ensayo en la fase negativa de la onda de la explosión.

En la [Figura 7](#) se presentan los resultados numéricos y experimentales del ensayo T2. Al igual que en el ensayo T1, se observa un ajuste numérico-experimental aproximado de las historias de sobrepresión e impulso. Si se comparan las [Figuras 6.a\)](#) y [7.a\)](#), al igual que las [Figuras 6.c\)](#) y [7.c\)](#), puede observarse que en el ensayo T2 la presión en el interior de la habitación no decae tanto como en el ensayo T1, lo cual se debe a la presión de “filling”.

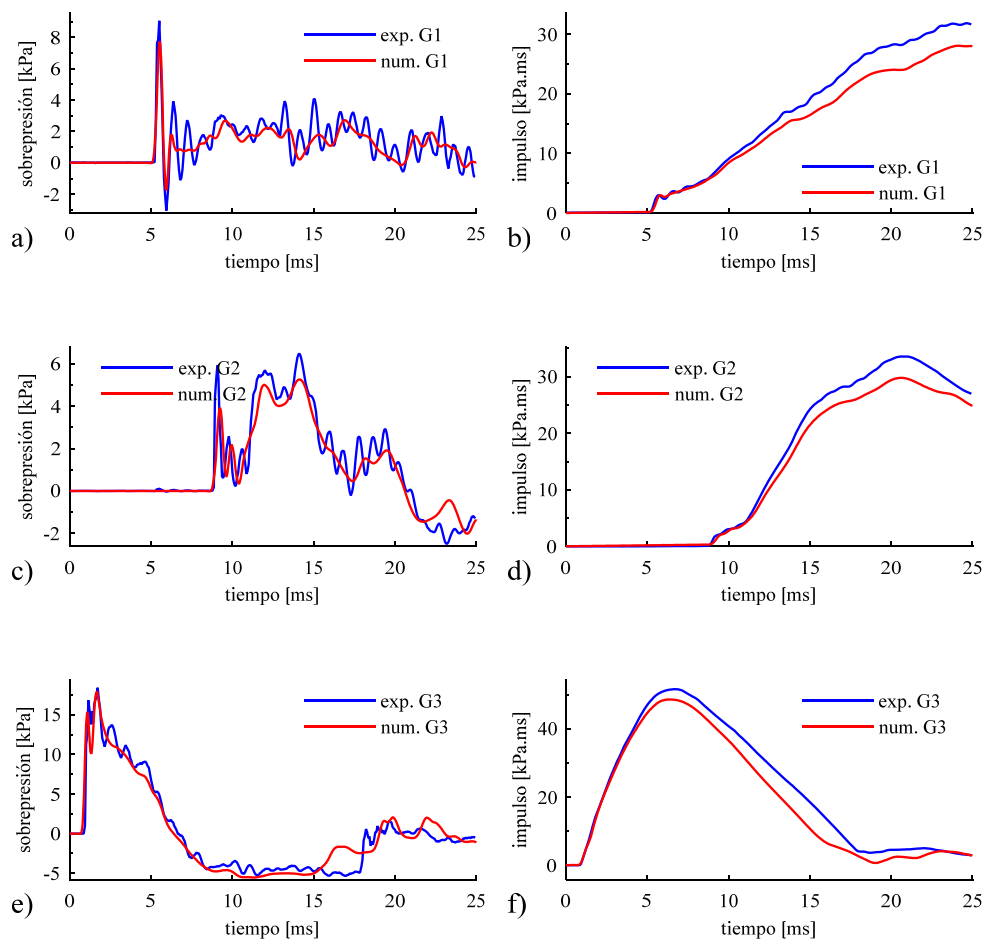


Figura 7 Comparación numérico-experimental, ensayo T2, sobrepresiones e impulsos.

A pesar de que los ensayos T1 y T2 tienen similares distancias escaladas, en el ensayo T2 la carga explosiva es 5 veces mayor, por lo tanto la duración de la fase positiva de la onda de presión es mayor también, aumentando el tiempo de exposición de la abertura a una presión positiva. Esto hace que el efecto de presión de “filling” sea más notorio en T2. El efecto de presión “filling” puede observarse claramente al comparar las historias de impulso de las Figuras 6.b) y 7.b), al igual que las Figuras 6.d) y 7.d), donde para el ensayo T2, al bajar menos la presión en el interior de la construcción, el impulso decae menos que en el caso del ensayo T1.

3.2 Cargas de mayor magnitud

En la Figura 8 se presentan los resultados de una modelación numérica similar a la del ensayo T1 (carga detonada a 15 m de la ventana, tamaño de elemento de 25 mm), pero con 100 kg de TNT, por lo que la distancia escalada es de $3,23 \text{ m/kg}^{1/3}$. Se puede observar como el efecto de incremento de la presión en el interior de la construcción es muy importante para cargas de mayor magnitud al comparar las Figuras 6.a) y 8.a).

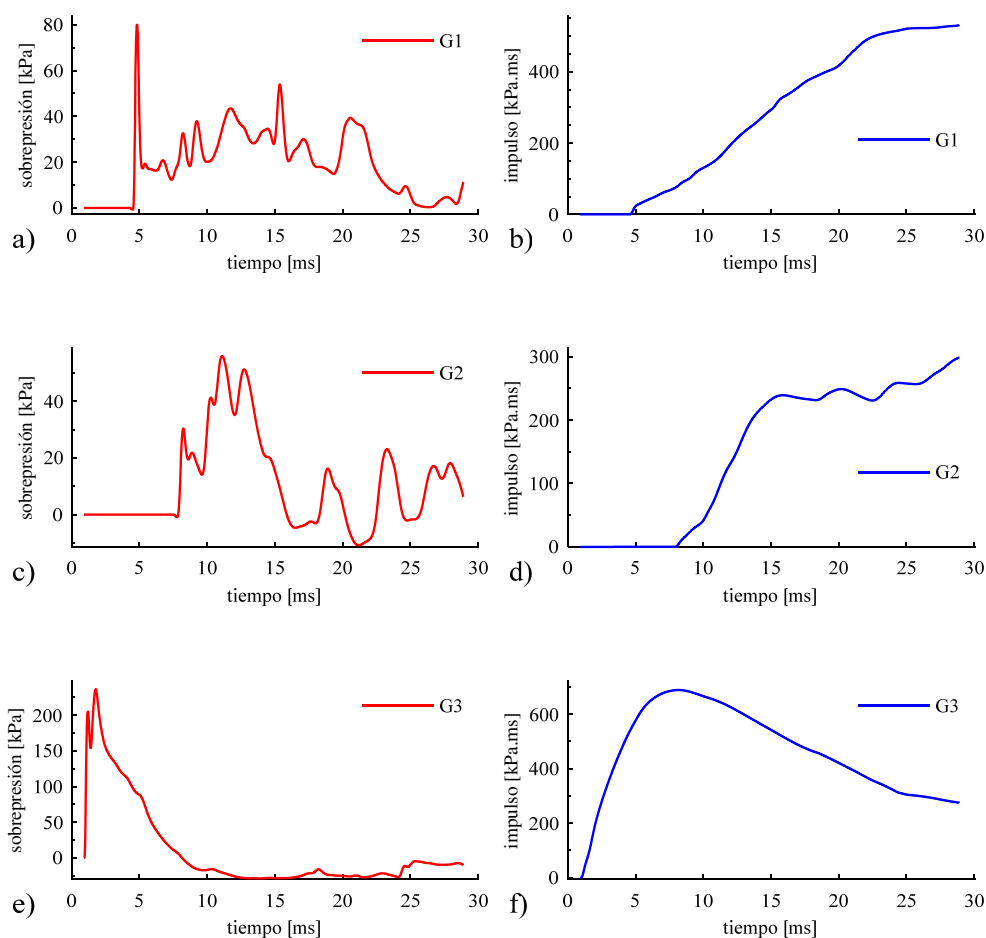


Figura 8 Estudio numérico, carga de 100 kg de TNT a 15 m, sobrepresiones e impulsos.

4 CONCLUSIONES

En el trabajo presentado se analizaron los resultados experimentales publicados en [Codina & Ambrosini \(2017\)](#), y se realizan modelaciones numéricas utilizando [ANSYS AUTODYN \(2005\)](#), lo cual permite determinar las limitaciones en la modelación de explosiones con esta herramienta, y determinar tamaños de malla adecuados para reproducir diferentes situaciones. Se observó que un mallado de 100 mm resulta adecuado para reproducir registros de sobrepresión en el exterior de la construcción dentro de las limitaciones del método, lo cual concuerda con lo observado en [Luccioni et al. \(2006\)](#). Por otra parte, es necesario un mallado más fino para ajustar los valores experimentales en el interior de las construcciones. El mallado de 25 mm logra una mejora en la representación de los registros en el interior de la construcción aunque no alcanza a captar los picos de sobrepresión máxima con detalle. A pesar de que los ensayos T1 y T2 tienen similares distancias escaladas, en el ensayo T2 la carga explosiva es mayor. Esto hace que el efecto de presión de “filling” sea más notorio en el ensayo T2, tanto en la medición experimental como en la modelación numérica. El efecto de presión “filling” puede observarse claramente al comparar las historias de impulso en el interior de la construcción, donde para el ensayo T2, al bajar menos la presión en el interior

de la construcción, el impulso decae menos que en el caso del ensayo T1. Las modelaciones numéricas permiten analizar diferentes casos de interés, algunos que resultarían poco prácticos de desarrollar en forma experimental. Se presentó un estudio numérico de una explosión similar a la del ensayo T1 (carga detonada a 15 m de la ventana, con un tamaño de elemento de 25 mm), pero con 100 kg de TNT, por lo que la distancia escalada es de $3,23 \text{ m/kg}^{1/3}$. Se observa como el efecto de presión de “filling” en el interior de la construcción es muy importante para cargas de mayor magnitud incrementando no solo la sobrepresión en el interior de la edificación sino el impulso.

REFERENCIAS

- Autodyn, Theory manual revision 4.3, . Dynamics, Century, Concord, CA., 2005.
- Codina, R., and Ambrosini, D., Full-scale testing of leakage of blast waves inside a partially vented room exposed to external air blast loading. *Shock Waves*, <https://doi.org/10.1007/s00193-017-0733-9>, 2017.
- Codina, R., Ambrosini, D., and de Borbón, F., Alternatives to prevent the failure of RC members under close-in blast loadings. *Eng. Fail. Anal.*, 60, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.038>, 2016.
- Esparza, E.D., Baker, W.E., and Oldham, G.A., Blast pressures inside and outside suppressive structures.. *Southwest Res. Inst San Antonio TX.*, 1975.
- Goel, M.D., and Matsagar, V.A., Blast-Resistant Design of Structures.. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 19:1–9, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000188)., 2014.
- Hyde, D.W., CONWEP users manual., US Army En. ed, . Vicksburg, MS, 1988.
- Luccioni, B., Ambrosini, D., and Danesi, R., Blast load assessment using hydrocodes. *Eng. Struct.*, 28:1736–1744, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.016>, 2006.
- Luccioni, B.M., Ambrosini, R.D., and Danesi, R.F., Analysis of building collapse under blast loads. *Eng. Struct.*, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.011>, 2004.
- Ram, O., Nof, E., and Sadot, O., Dependence of the blast load penetrating into a structure on initial conditions and internal geometry. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 78:65–74, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.05.012>, 2016.
- Rose, T.A., Smith, P.D., and May, J.H., The interaction of oblique blast waves with buildings. *Shock Waves*, 16:35–44, <https://doi.org/10.1007/s00193-006-0051-0>, 2006.
- Smith, P.D., Rose, T.A., Krahe, S.L., and Franks, M.A., Façade failure effects on blast propagation along city streets. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, 156:359–365, <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.4.359>, 2003.
- TM-5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, 1986.
- Tyas, A., Warren, J.A., Bennett, T., and Fay, S., Prediction of clearing effects in far-field blast loading of finite targets. *Shock Waves*, 21:111–119, <https://doi.org/10.1007/s00193-011-0308-0>, 2011.
- UFC 3-340-02, Structures To Resist the Effects of Accidental, 2008.
- van der Voort, M.M., van Wees, R.M.M., Brouwer, S.D., van der Jagt-Deutekom, M.J., and Verreault, J., Forensic analysis of explosions: Inverse calculation of the charge mass. *Forensic Sci. Int.*, 252:11–21, <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.04.014>, 2015.
- Wang, X., and Remotigue, M., High-fidelity simulations of blast loadings in urban environments using an overset meshing strategy, <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0680-x>, 2016.