

## MUROS DE MAMPOSTERIA SOMETIDOS A EXPLOSIONES

### MASONRY WALLS UNDER BLAST

Ramón Codina <sup>a,b</sup>, Daniel Ambrosini <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina,  
<http://www.uncarolina.edu.ar/gmc>

<sup>b</sup> CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y tecnológicas, Argentina.  
[www.conicet.gov.ar/](http://www.conicet.gov.ar/)

**Palabras clave:** Mampostería Confinada; explosiones, onda de choque subterránea, daño, ladrillos.

**Resumen.** Las organizaciones terroristas de todo el mundo han utilizado explosivos en muchas ocasiones para llevar a cabo atentados en centros urbanos. Algunas de las víctimas y los heridos en estos atentados suelen deberse a colapsos estructurales y al impacto de escombros. Esta amenaza obliga a los investigadores a estudiar el comportamiento de los sistemas de construcción ordinarios expuestos a cargas impulsivas extremas. La mampostería encadenada es un sistema de construcción muy utilizado en zonas sísmicas de muchas partes del mundo, ampliamente estudiados bajo cargas sísmicas. En cambio, son escasos los estudios sobre su respuesta a cargas impulsivas fuera del plano, como las causadas por explosiones intencionadas o accidentales. En este trabajo se estudian 2 explosiones con diferentes distancias escaladas. Se utilizaron explosivos apoyados el suelo cerca de muros de mampostería encadenada con una abertura. Se analizó la compleja interacción entre las ondas de presión y la estructura. Se modela usando códigos comerciales las sobrepresiones, impulsos y la respuesta estructural.

**Keywords:** confined masonry; blast, ground shock; damage; clay bricks.

**Abstract.** Terrorist organizations around the world have used explosives on many occasions to carry out attacks in urban centers. Some of the casualties and injuries in these attacks are often due to structural collapse and debris impact. This threat forces researchers to study the behavior of ordinary building systems exposed to extreme impulsive loads. Confined masonry is a widely used building system in seismic zones in many parts of the world, extensively studied under seismic loads. On the other hand, studies on its response to out-of-plane impulsive loads, such as those caused by intentional or accidental explosions, are scarce. In this work, 2 explosions with different scaled distances are studied. Explosives supported on the ground near confined masonry walls with an opening were used. The complex interaction between the pressure waves and the structure was analyzed. Overpressures, impulses and structural response were modeled using commercial codes.

## 1 INTRODUCCION

Las explosiones en entornos urbanos es una amenaza real debido a la actividad terrorista y a accidentes industriales. Las cargas impulsivas generadas por las explosiones raramente son tenidas en cuenta en el diseño de estructuras ordinarias. Cuando las explosiones están al nivel del suelo, impactan a las estructuras a través de las ondas de sobrepresión en el aire y las ondas que se transmiten por el suelo. [Smith et al. \(2003\)](#) y [Rose et al. \(2006\)](#) estudiaron la interacción de las explosiones con las fachadas de los edificios. Las cargas de presión que reciben las estructuras no solo dependen del explosivo sino de las dimensiones de las estructuras [Tyas et al. \(2011\)](#). Las ondas de presión por el aire ingresan por las aberturas de las estructuras generando múltiples reflexiones en el interior, e incrementando la presión interna, estos efectos complejos han sido analizados por diferentes autores ([Caçoilo et al., 2018](#); [Codina and Ambrosini, 2017](#); [Ram et al., 2016](#)).

Los impactos de explosiones semiesféricas, ubicadas cerca de la superficie del suelo es un tema de interés desde hace décadas, ([Hao and Wu, 2001](#); [Wu et al., 2003b, 2003a](#)).

Las ondas que se trasladan por el aire y por el suelo presentan usualmente diferentes velocidades de propagación, por lo que el impacto sobre las estructuras puede ser en diferentes tiempos. Es recomendable tener en cuenta esto en el análisis de las estructuras expuestas a explosiones ya que la respuesta estructural es sensible a estos efectos, [Wu y Hao \(2005\)](#).

Las estructuras de mampostería encadenada son comunes en Europa, Asia, y América Latina, [Tomažević y Klemenc, \(1997\)](#). Los muros de mampostería son vulnerables a cargas fuera del plano, especialmente cargas impulsivas de alta intensidad. Los estudios de construcciones de mampostería encadenada expuestas a explosiones son escasos, [Badshah et al., \(2020\)](#), estudió diferentes configuraciones de mampostería entre las cuales figuraba la mampostería encadenada. En el trabajo de [Ahmad et al. \(2014\)](#), se realizaron ensayos para estudiar la respuesta de muros de mampostería no reforzada ante explosiones, midiendo aceleraciones en los muros.

Tradicionalmente, los parámetros para controlar el riesgo de desprendimiento de escombros en muros expuestos a explosiones han sido el espesor de la pared, y el refuerzo con barras de acero, [Zapata y Weggel \(2008\)](#). Actualmente se están estudiando numerosos materiales para el refuerzo de estructuras existentes, como materiales compuestos y polímeros.

En este trabajo se presenta la respuesta estructural de una construcción de mampostería encadenada expuesta a 2 explosiones. El explosivo en ambos ensayos se ubica sobre el suelo a diferentes distancias de la construcción. Se utilizó AUTODYN para obtener los registros de sobrepresión en diferentes puntos en la construcción y LS-DYNA para obtener la respuesta dinámica del muro.

## 2 ENSAYO EXPERIMENTAL

La estructura de mampostería utilizada en el estudio se presenta en la [Figura 1](#). Se usaron ladrillos típicos de arcilla, 270 mm × 165 mm × 65 mm, con juntas de mortero con una parte de cemento y tres de arena de 25mm de espesor.



Figura 1: Estructura de mampostería.

La estructura presenta 4 muros y una losa, solo uno de los muros tiene una abertura, Figura 1.

El explosivo usado en los ensayos fue Gelamón VF65. Las propiedades de este explosivo comercial se presentan en la [Tabla 1](#). En un trabajo previo, [Codina et al. \(2016\)](#) la equivalencia entre el GELAMON y el TNT fue verificada .

Densidad g/cm <sup>3</sup>	Velocidad de detonación m/s	Presión de detonación MPa	Volumen de gases m <sup>3</sup> /kg	Equivalencia de TNT
1.5	5300(mín)	10,500	0.811	0.65

Tabla 1: Propiedades del GELAMON VF65 (<https://www.fm.gob.ar>)

La [Tabla 2](#) presenta los detalles de los ensayos T1 y T2. El explosivo fue colocado apoyado en el suelo, por lo que la explosión desarrollada corresponde a una explosión semiesférica.

Ensayo	Carga eq. de TNT W (kg TNT)	Pared frontal	Distancia a la pared frontal R [m]	Distancia escalada Z [m/kg <sup>1/3</sup> ]	Configuración de la explosión
T1	2.28	Con ventana	8	6.08	Explosión superficial
T2	2.28	Con abertura	4	3.04	Explosión superficial

Tabla 2: Características de los ensayos T1 y T2

### 3 MODELACION NUMERICA DE LA EXPLOSION EN EL AIRE

Se utilizó el código ANSYS AUTODYN para determinar las sobrepresiones e impulsos que recibe la estructura en los ensayos T1 y T2. El suelo fue modelado como una frontera rígida para las explosiones, por lo que solo se tuvo en cuenta las ondas de presión que viajan por el

aire. La estructura se modeló como un rígido.

Se utilizó la técnica de remapeo, en tres estadios de la explosión. En una instancia inicial, se utilizó una malla 2D Euler Godunov multimaterial de 1000mmx700mm, con un tamaño de celda de 2,5mm, Figura 2. En la Figura 2a) se observa el explosivo modelado como TNT equivalente a la carga de GELAMON VF65 con el punto de detonación, y el aire. El explosivo tiene forma cilíndrica por lo que puede esta etapa resolverse como un problema bi-dimensional con simetría axial. El eje de simetría X se encuentra horizontal en la en la figura pero es perpendicular a la superficie del suelo. En esta etapa se modela la explosión hasta los 1.66ms poco antes de que las ondas de presión alcancen la frontera del modelo, Figura 2b).

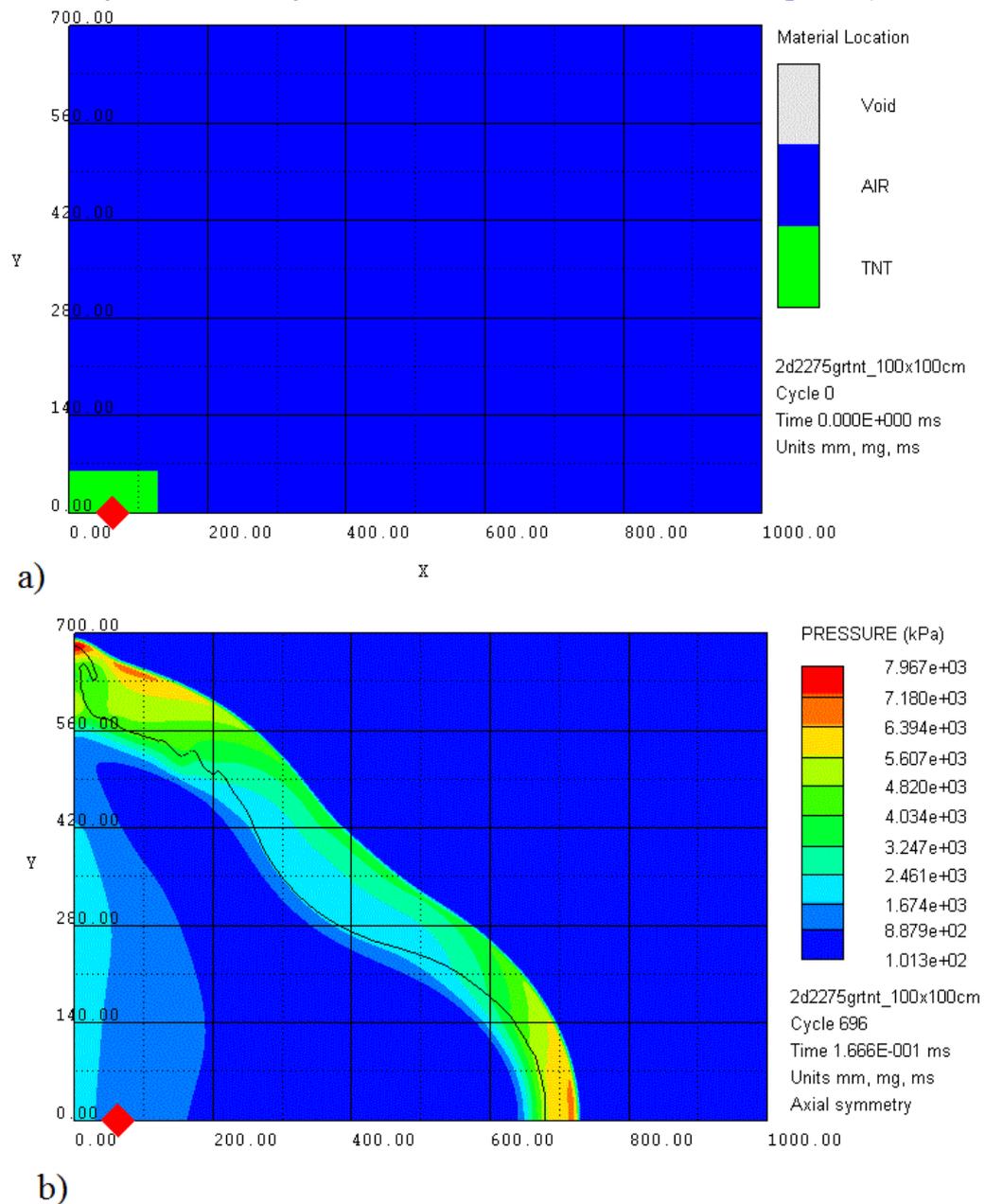


Figura 2 Etapa 1 de la modelación. a) Malla Euler G MM. b) Presiones a los 1.66ms.

El último estado de la etapa 1 se remapeó en una segunda malla 2D Euler FCT. En este caso el TNT puede considerarse como un gas ideal, por lo que solo se tiene aire como material. En este estadio para reproducir el ensayo T1 se usó una malla 2D de 8000mmx8000mm, mientras que en el ensayo T2 una malla de 4000mmx4000mm. En ambos casos se utilizó un tamaño de celda de 5mm. El propósito de este segundo estado es modelar las explosiones en todo su desarrollo 2D hasta antes de impactar la estructura, donde pierde la simetría axial y se convierte en un problema 3D.

Finalmente se remapea el último estado de la etapa 2 en una malla 3D Euler FCT, donde se modela la interacción de las ondas con la geometría de la estructura, el tamaño de la malla en esta última etapa es de 13800mmx6000mmx7000mm con un tamaño de celda de 25mm, [Figura 3](#). En la [Figura 4](#) se observa el ingreso de la explosión por la abertura, en el plano de simetría Plano Y=0, y la reflexión en el interior de la construcción para ambos ensayos.

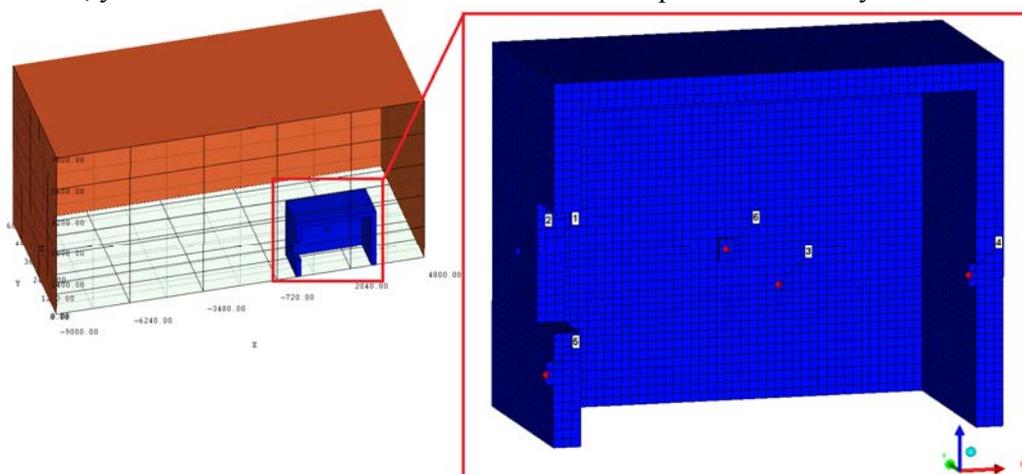


Figura 3 Etapa 3 de la modelación 3D.

Los registros de presión en los gauges 3, 4, 5 y 6 se presentan en la [Figura 5](#). El gauge 5 presenta la presión reflejada sobre la fachada. Se observan presiones absolutas máximas positivas de 307 KPa para el ensayo T2 y 150 KPa para el ensayo T1. Los gauges en el interior de la estructura presentan presiones absolutas menores de 130 KPa, pero se observa cómo se producen múltiples reflexiones en el interior en los 40 ms graficados. Este efecto de múltiples impactos sobre la estructura genera un incremento en el impulso acumulado en el interior de la habitación, lo que lleva a que a pesar de que las sobrepresiones son muy inferiores a las observadas en el exterior, los impulsos no son reducidos en la misma medida. Estos resultados se corresponden con lo observado en [Codina y Ambrosini \(2019\)](#).

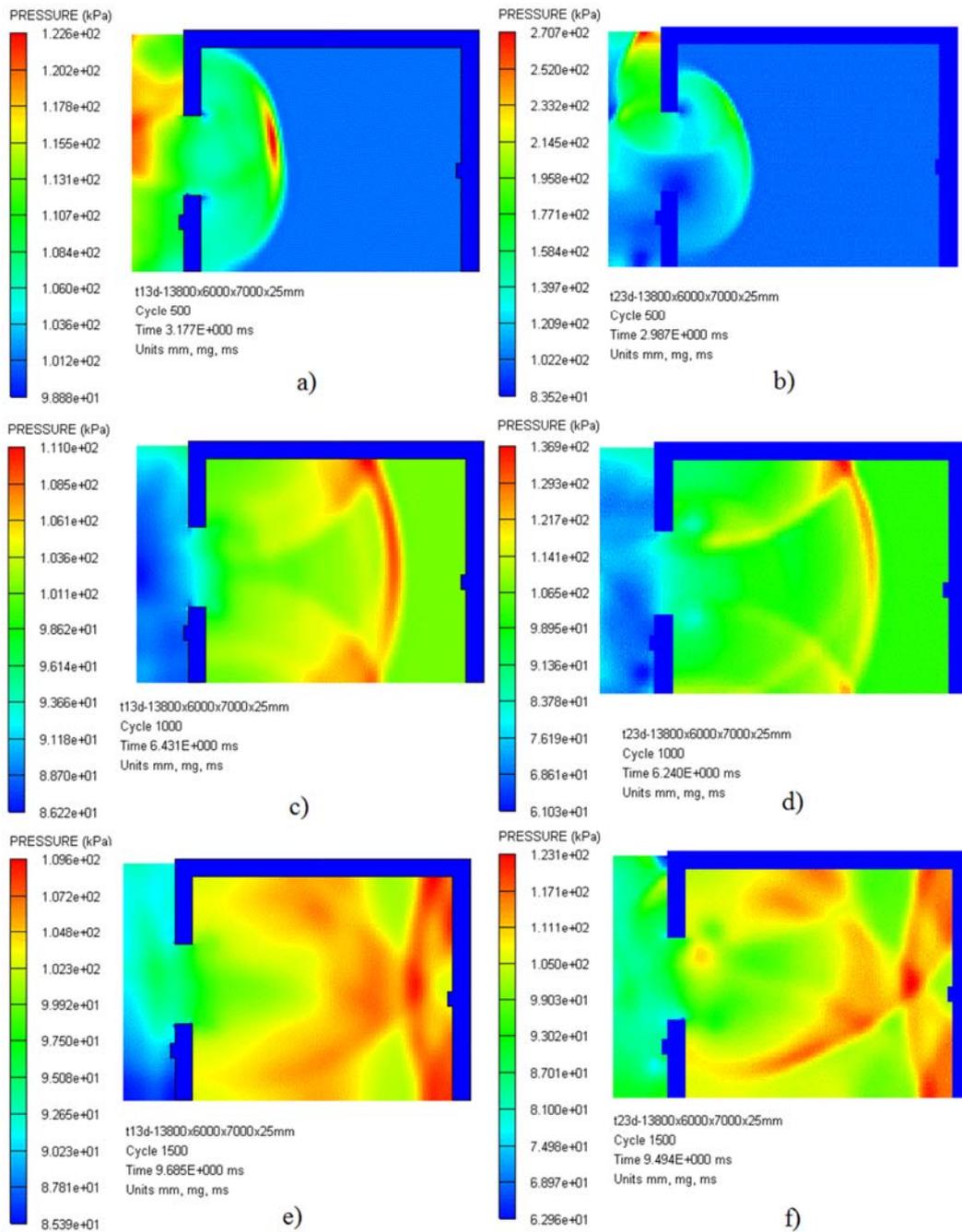


Figura 4 Desarrollo de la explosión en el interior de la estructura. a, c y e) Ensayo T1. b, d y f) Ensayo T2.

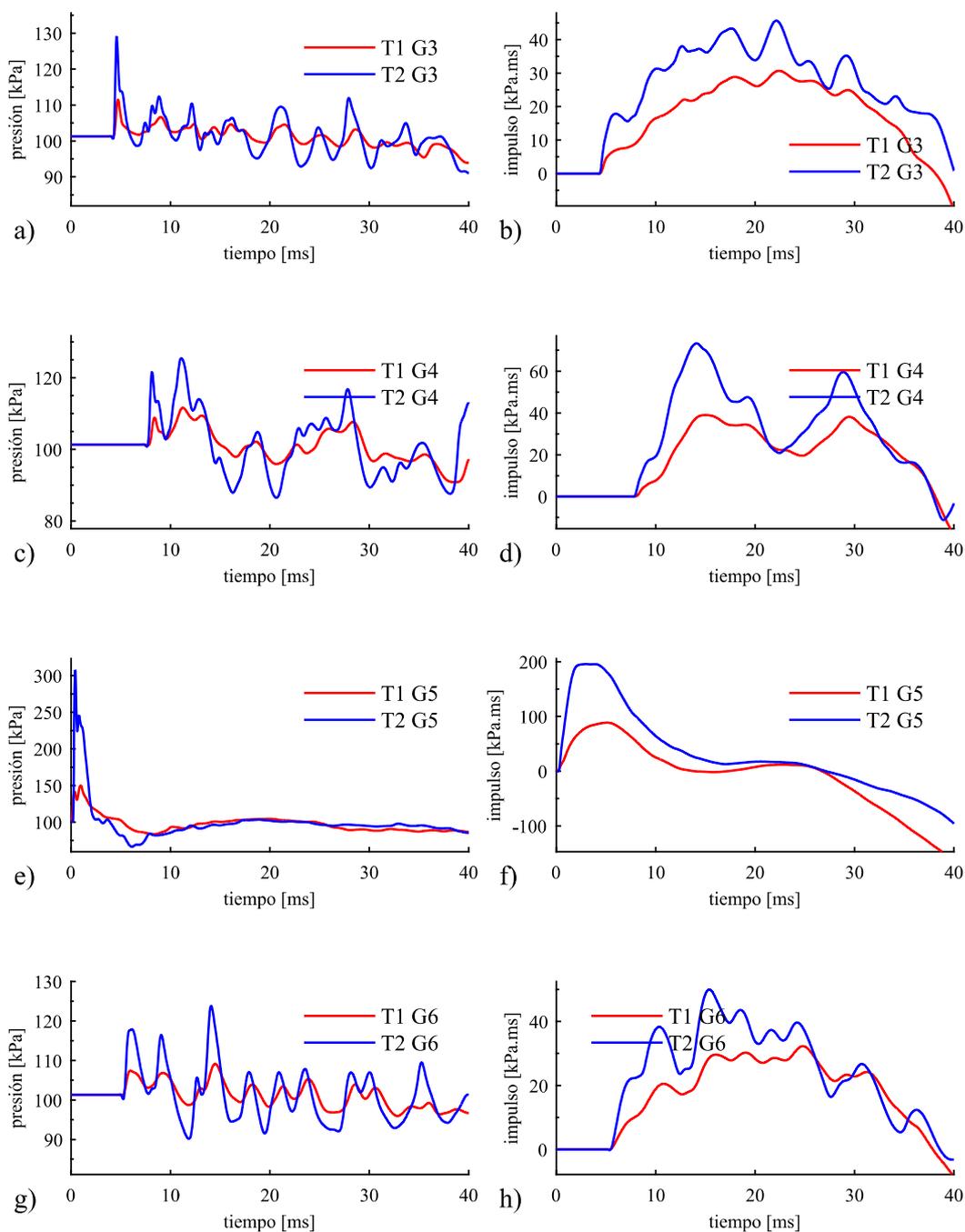


Figura 5 Desarrollo de la explosión en el interior de la estructura. a, c y e) Ensayo T1. b, d y f) Ensayo T2.

#### 4 ACELERACIONES EXPERIMENTALES

Durante el ensayo se registraron aceleraciones sobre la cara interior del muro en la ubicación del gauge 1 de la Figura 3. Su ubicación relativa a la abertura es a 460 mm medido desde el borde de la ventana en dirección Y, y a 1130mm del suelo. Se utilizó un acelerómetro PCB Piezotronics 352B01 y una placa de adquisición de datos (ComputerBoard PCM-DAS16D/16,

100 kHz band- width). La señal fue muestreada a una tasa de 50000 muestras por segundo en ambos ensayos. Los registros de aceleración se presentan en la Figura 6. La aceleración máxima alcanzada en el ensayo T1 es de 219g mientras que en el ensayo T2, se llegan a medir 740g. También se observa entre los 2 y 3 ms en la Figura 6b) un impacto extra, el cual se debe a la onda que viaja por el suelo.

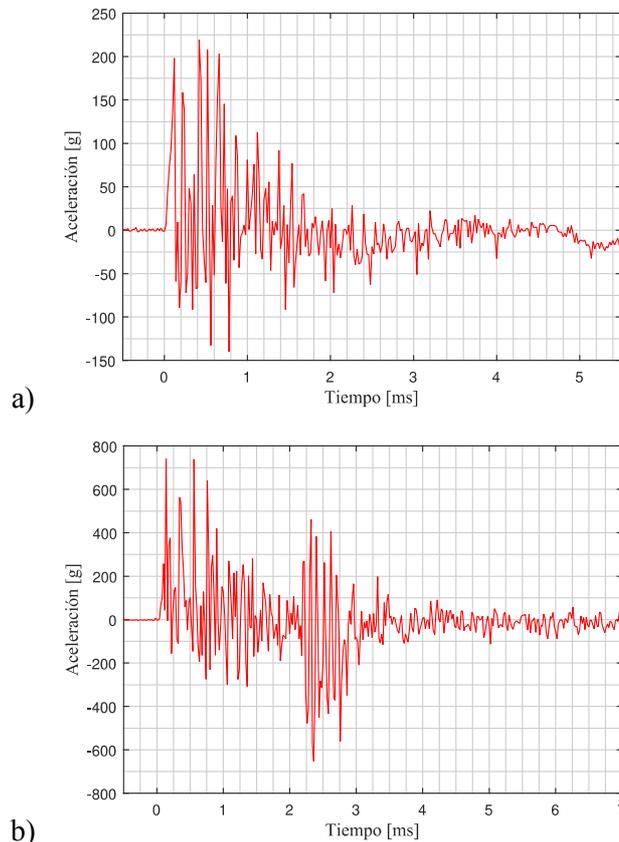


Figura 6 Registros de aceleración. a) Ensayo T1. b) Ensayo T2.

## 5 RESPUESTA ESTRUCTURAL MODELADA CON LS-DYNA

Se desarrollaron modelaciones con LS-DYNA, para simular la respuesta de la estructura para las cargas explosivas de los ensayos T1 y T2. Para esto se modeló la construcción de mampostería con elementos finitos con dos tamaños de elementos, 60 mm y 30 mm a fin de observar como el tamaño de elemento modifica la respuesta estructural. Para la carga explosiva se usó el método \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED, que permite cargar presiones analíticas sobre una superficie sin necesidad de modelar el aire. El modelo de material empleado para la mampostería fue el RHT, con los parámetros que muestra la Figura 7.

```
*MAT_RHT_TITLE
brickRHT]
$# mid ro shear onempa epsf b0 b1 t1
2 1.8 0.0102 0.0 0.5 1.22 1.22 0.27
$# a n fc fs* ft* q0 b t2
1.6 0.951.35000E-4 0.1078 0.0813 0.761.00000E-5 0.0
$# e0c e0t ec et betac betat ptf
0.005 0.0093.00000E223.00000E22 0.06683 0.059684 0.0
$# gc* gt* xi d1 d2 epm af nf
0.4434 0.2222 0.4 0.018 1.0 0.01 1.6 0.95
$# gamma a1 a2 a3 pe1 pco np alpha
0.0 0.27 0.31 0.319.90000E-5 0.004 3.0 1.184
```

Figura 7 RHT usado para modelar la mampostería [ $\mu$ s, cm, g, Mbar].

En la Figura 8 se presentan los resultados de los modelos para ambos tamaños de elementos. Se observa que los valores de aceleración son muy inferiores a los medidos experimentalmente, 5 veces menores los valores máximos.

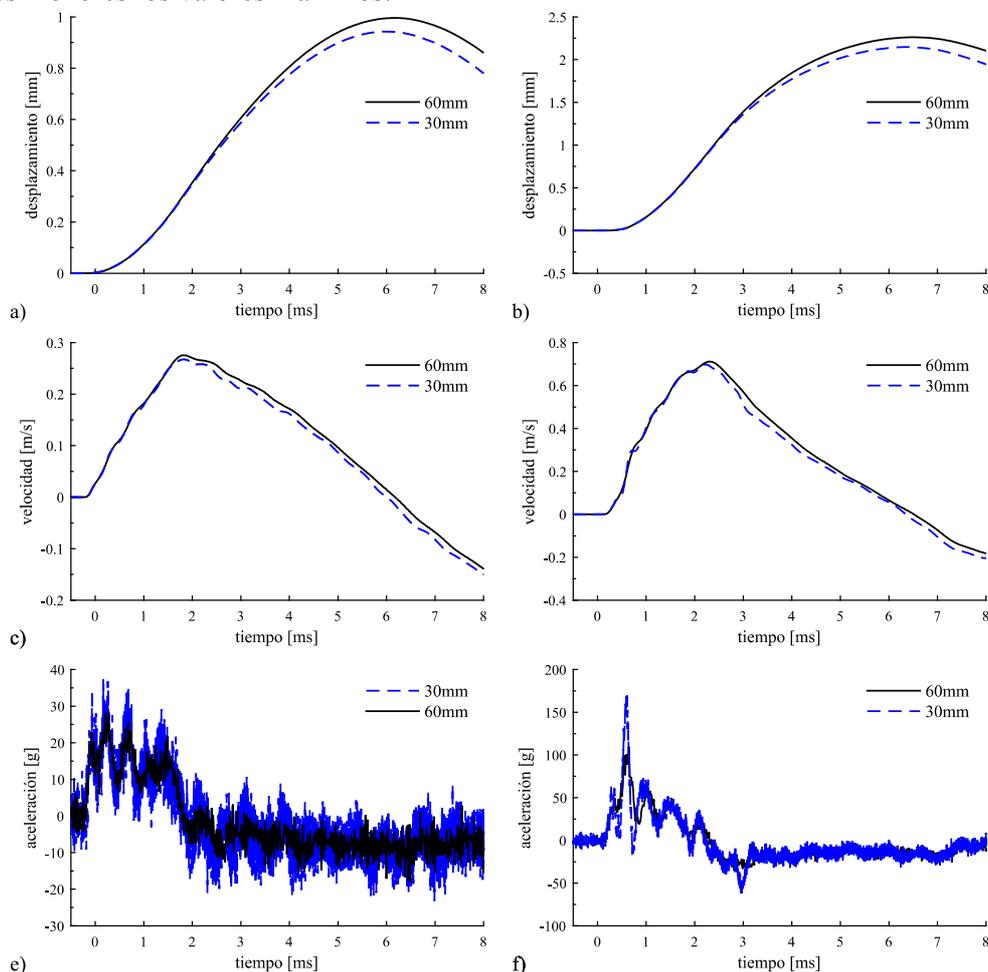


Figura 8 Respuesta del modelo, desplazamientos, velocidad y aceleración . a, c y e) T1. b, d y f) T2.

También se observa que en especial la aceleración es muy sensible al mallado, por lo que para alcanzar valores cercanos a lo medido experimentalmente hay que mallar con elementos de menor tamaño.

## 6 CONCLUSIONES

Se utilizó AUTODYN para obtener los registros de presión en diferentes puntos en la construcción y LS-DYNA para obtener la respuesta dinámica del muro. Se observan los efectos de múltiples reflexiones de onda en el interior de la construcción, lo cual genera un incremento en el impulso acumulado. También se presentaron los registros de aceleración sobre el muro de mampostería expuesta a las dos explosiones. Se observaron valores de aceleración 5 veces mayores en el ensayo que en los modelos realizados con LS-DYNA. Estas diferencias se pueden reducir con el tamaño de los elementos.

## REFERENCIAS

- Ahmad, S., Elahi, A., Pervaiz, H., Rahman, A.G.A., Barbhuiya, S., 2014. Experimental study of masonry wall exposed to blast loading. *Mater. Constr.* 64. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.01513>
- Badshah, E., Naseer, A., Ashraf, M., Ahmad, T., 2020. Response of masonry systems against blast loading. *Def. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.07.003>
- Caçoilo, A., Teixeira-Dias, F., Mourão, R., Belkassem, B., Vantomme, J., Lecompte, D., 2018. Blast wave propagation in survival shelters: experimental analysis and numerical modelling. *Shock Waves* 28, 1169–1183. <https://doi.org/10.1007/s00193-018-0858-5>
- Codina, R., Ambrosini, D., 2019. Numerical and analytical study of overpressures and impulses inside a masonry box subjected to external blast loading. *Int. J. Prot. Struct.* <https://doi.org/10.1177/2041419619843636>
- Codina, R., Ambrosini, D., 2017. Full-scale testing of leakage of blast waves inside a partially vented room exposed to external air blast loading. *Shock Waves* 28, 227–241. <https://doi.org/10.1007/s00193-017-0733-9>
- Codina, R., Ambrosini, D., de Borbón, F., 2016. 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>
- Hao, H., Wu, C., 2001. Scaled-distance relationships for chamber blast accidents in underground storage of explosives. *Fragblast* 5, 57–90. <https://doi.org/10.1076/frag.5.1.57.3313>
- Ram, O., Nof, E., Sadot, O., 2016. 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>
- Rose, T.A., Smith, P.D., May, J.H., 2006. The interaction of oblique blast waves with buildings. *Shock Waves* 16, 35–44. <https://doi.org/10.1007/s00193-006-0051-0>
- Smith, P.D., Rose, T.A., Krahe, S.L., Franks, M.A., 2003. 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>
- Tomažević, M., Klemenc, I., 1997. Seismic behaviour of confined masonry walls. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 26, 1059–1071. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199710\)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199710)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M)
- Tyas, A., Warren, J.A., Bennett, T., Fay, S., 2011. 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>
- Wu, C., Hao, H., 2005. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions. *Int. J. Impact Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002>
- Wu, C., Hao, H., Lu, Y., Zhou, Y., 2003a. Characteristics of stress waves recorded in small-scale field blast tests on a layered rock-soil site. *Geotechnique* 53, 587–599. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.6.587>
- Wu, C., Lu, Y., Hao, H., Lim, W.K., Zhou, Y., Seah, C.C., 2003b. Characterisation of underground blast-induced ground motions from large-scale field tests. *Shock Waves* 13, 237–252. <https://doi.org/10.1007/s00193-003-0212-3>
- Zapata, B.J., Weggel, D.C., 2008. Collapse Study of an Unreinforced Masonry Bearing Wall Building Subjected to Internal Blast Loading. *J. Perform. Constr. Facil.* 22, 92–100. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2008\)22:2\(92\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2008)22:2(92))