

MODELACIÓN NUMÉRICA DE MUROS DE MAMPOSTERÍA SOMETIDOS A EXPLOSIONES

NUMERICAL MODELING OF MASONRY WALLS SUBJECTED TO EXPLOSIONS.

Codina, Ramón^{a,b} y Ambrosini, Daniel^{a,b}

^aFacultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo . Mendoza, Argentina,
<https://ingenieria.uncuyo.edu.ar/>

^bCONICET, Argentina. www.conicet.gov.ar/

Palabras clave: Explosiones, Mampostearía Encadenada, Daño.

Resumen. Los muros de mampostería son ampliamente usados en centros urbanos. El estudio de su respuesta frente a cargas explosivas es fundamental, tanto para perfeccionar el diseño de estructuras susceptibles a estas acciones, como para desarrollar herramientas de análisis de atentados, ataques militares o accidentes industriales. La predicción de la respuesta estructural de muros ante explosiones supone un desafío complejo, dada su naturaleza no lineal, influenciada por factores como la adherencia y los mecanismos de fricción entre sus componentes. En los últimos años, diversos autores han propuesto modelos de simulación con distintos niveles de complejidad. Estos incluyen micro-modelos, que detallan todos los componentes del muro, micro-modelos simplificados, donde el mortero y las interfaces se agrupan para formar superficies de contacto entre los ladrillos y macro-modelos homogéneos, que consideran un material orto trópico para reflejar las variaciones en el comportamiento mecánico en diferentes direcciones. Es esencial estudiar y comparar estos modelos, así como calibrar los numerosos parámetros que los definen. Este trabajo presenta una alternativa de modelación explícita y compara sus resultados con datos experimentales previamente obtenidos.

Keywords: Blast, Confined Masonry, Damage.

Abstract. Masonry walls are widely used in urban centers. Studying their response to explosive loads is crucial, both for improving the design of structures susceptible to such actions and for developing tools for analyzing terrorist attacks, military assaults, or industrial accidents. Predicting the structural response of walls to explosions is a complex challenge due to their nonlinear nature, influenced by factors such as adhesion and friction mechanisms between their components. In recent years, various authors have proposed simulation models with different levels of complexity. These include micro-models, which detail all the components of the wall; simplified micro-models, where the mortar and interfaces are grouped to form contact surfaces between the bricks; and homogeneous macro-models, which consider an orthotropic material to reflect the variations in mechanical behavior in different directions. It is essential to study and compare these models, as well as to calibrate the numerous parameters that define them. This work presents an alternative explicit modeling approach and compares its results with previously obtained experimental data.

1. INTRODUCCIÓN

Los muros de mampostería encadenada son una alternativa de construcción económica y simple que no requiere mano de obra especializada, lo que hace que esté ampliamente difundida en todo el mundo, en especial América Latina, Europa y Asia, [Tomažević y Klemenc \(1997\)](#). Existe un amplio conocimiento respecto de su respuesta a cargas estáticas y dinámicas como sismos, pero su respuesta a cargas impulsivas es menos conocida. Resulta de interés explorar su comportamiento ante explosiones fuera del plano, a los fines de mejorar los diseños estructurales, poder elaborar técnicas de protección y minoración de daños, y contribuir en el desarrollo herramientas de análisis en situaciones extremas como atentados, accidentes industriales y conflictos bélicos. Los trabajos científicos referidos a este tema son escasos, [Badshah et al. \(2021\)](#), 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. Diferentes autores han propuesto modelos de simulación que abordan este problema con distintos niveles de complejidad. Estos incluyen micro-modelos, que detallan todos los componentes del muro; micro-modelos simplificados, donde el mortero y las interfaces se agrupan para formar superficies de contacto entre los ladrillos; y macro-modelos homogéneos, que consideran un material ortotrópico para reflejar las variaciones en el comportamiento mecánico en diferentes direcciones [Michaloudis y Gebbeken \(2019\)](#); [Wang et al. \(2021\)](#). En el presente trabajo se usa un modelo del tipo micro-modelo simplificado, y se compara su respuesta con la observada experimentalmente en [Codina y Ambrosini \(2022\)](#).

2. DESCRIPCIÓN DE MODELO NUMÉRICO

El muro de mampostería estudiado, se presenta en la Fig. 1. Esta compuesto de ladrillos de arcilla cocida de $27\text{cm} \times 16\text{cm} \times 6.5\text{cm}$, con juntas de mortero de 3cm de espesor. Para la molelación se utilizó un tamaño de elemento de 25mm , el cual fue adecuado porque en los Micro-modelos simplificados, donde las juntas son representadas por elementos de interfase entre ladrillos, no hay partes tan pequeñas que requieran un mallado mas fino. Las dimensiones de los ladrillos fueron aumentadas a fin de tomar las separaciones de las juntas de mortero. Para la interfase se usaron elementos **MAT_COHESIVE_MIXED_MODE*, con 5×10^{-5} mm de espesor, con el fin de modelar el efecto de adherencia entre los ladrillos y las juntas de cemento, que una vez vencida da lugar a la fuerte fricción de los ladrillos entre si y con el marco perimetral. Se uso **CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE*, con valores de coeficiente de fricción estática de 0.65 y dinámica de 0.45. El modelo está compuesto por ladrillos de dimensiones modificadas, elementos de interfase entre ladrillos, elementos de interfase entre ladrillos y el marco perimetral de hormigón. Se presenta un despiece de los diferentes elementos en la Fig. 2.

El uso de elementos de interfase del tipo, **MAT_COHESIVE_MIXED_MODE*, permite tener en cuenta tres tipos de falla y su interacción, modo I, apertura normal de la interfaz, modo II, deslizamiento en el plano tangencial, modo III, deslizamiento fuera del plano. El modelo permite definir la contribución de cada modo en el proceso de daño, capturando así un comportamiento realista de la falla de interfaces bajo cargas combinadas. Incluye parámetros

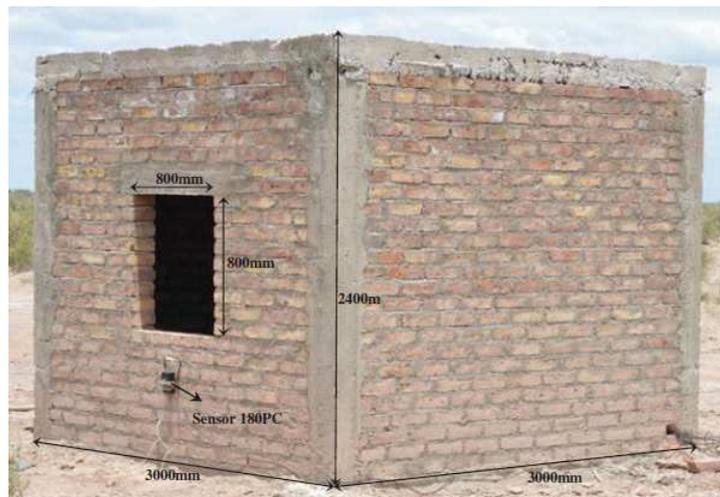


Figura 1: Muro de mampostería, Codina y Ambrosini (2022) .

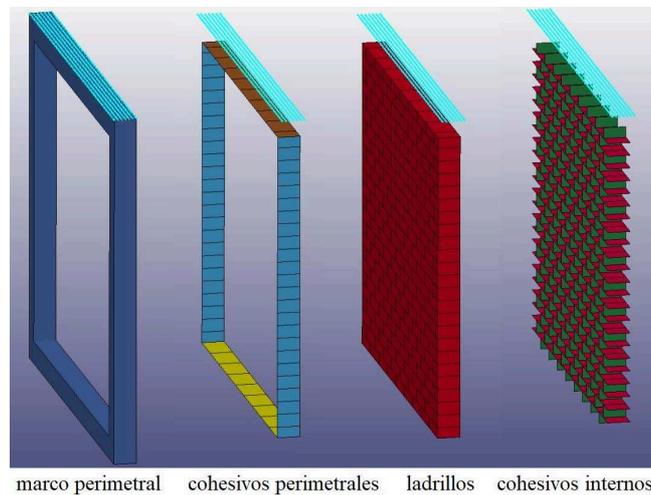


Figura 2: Despiece de las diferentes partes del modelo de mampostería.

que controlan la energía de fractura, lo que permite reproducir el comportamiento del material cohesivo desde la iniciación de la grieta hasta la separación completa. La energía de fractura se puede definir para cada uno de los modos de falla, y el criterio de falla utiliza una combinación de las energías de los tres modos, lo que se conoce como "modo mixto". Los tres modos de falla se representan en la Fig. 3.

La carga explosiva se modeló con **LOAD_BLAST_ENHANCED*, usando una carga de 4 kg de TNT, que se aproxima mejor a nivel de impulsos y sobre-presiones, a la carga aplicada en el estudio experimental de Codina y Ambrosini (2022).

La modelación responde al tipo Micro-modelo simplificado, implementado en LS_DYNA, donde las unidades empeladas fueron *mm, s*,

Al igual que en Chen et al. (2023), para los ladrillos se usó el modelo de material **MAT_RHT*, Borrvall y Riedel (2011), Tabla 1. Este modelo posee 3 superficies de resistencia, la superficie de fluencia, que delimita la zona de comportamiento elástico, la superficie de falla, que representa el estado de esfuerzo en el cual el material se rompe o falla. A medida que se aplica carga al material y se excede su límite elástico, se mueve hacia esta superficie. En este punto, la resistencia del material está casi agotada y la estructura sufre un daño severo, y finalmente la superficie de

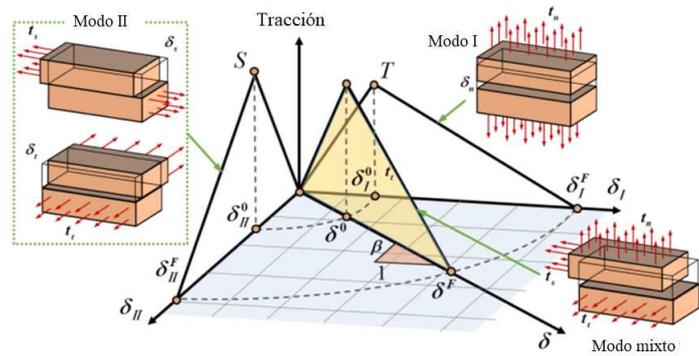


Figura 3: Modelo *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE, Chen et al. (2023).

resistencia residual, alcanzada una vez que se acumula suficiente deformación plástica, incrementando el parámetro de daño D , Borrvall y Riedel (2011), en esta zona el material no resiste tracción. En la Fig. 4, se representan las tres superficies.

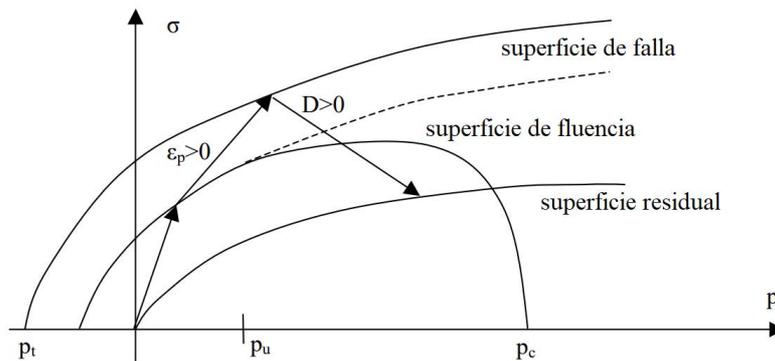


Figura 4: Superficies de resistencia de modelo RHT, Borrvall y Riedel (2011).

r_o	shear	epsf	b_0	b_1	t_1
1.8×10^{-9}	3.4676×10^3	2	1.22	1.22	3.53×10^4

a	n	f_c	f_s^*	f_t^*	q_0	b	t_2
1.6	0.61	4	0.13	0.09	0.6805	0.0105	0

Tabla 1: Modelo RHT aplicado a los ladrillos.

Donde; r_o es la densidad T/mm^3 , shear es el módulo de corte elástico en MPa , epsf es la deformación plástica de erosión, b_0, b_1, t_1 y t_2 son parámetros de la ecuación de estado, a y n son parámetros de la superficie de falla, f_c es la resistencia a compresión en MPa , f_s^* y f_t^* son las resistencias de corte y tracción normalizadas con f_c , q_0 y b son factores de dependencia del ángulo de lode.

Dentro de los elementos cohesivos utilizados podemos distinguir dos tipos, los internos, que vinculan ladrillo con ladrillo y los perimetrales. En la Tabla 2, se presentan los parámetros adoptados para los cohesivos internos.

En la mampostería encadenada debido a su forma de ejecución y rugosidad en la superficie perimetral de los muros, se tiene una fuerte cohesión entre el marco del encadenado y

el perímetro del muro de mampostería, esto se observó experimentalmente, al no presentarse deslizamientos relativos, aunque si se observaron grietas por tracción en la interfase. Para lograr reproducir este efecto de adherencia entre el muro y el marco de hormigón, t y s de los elementos cohesivos perimetrales fueron afectados por un factor de 12.

r_o	en	et	gic	$giic$
1.8×10^{-6}	5.9665×10^1	2.3866×10^2	6.16×10^{-2}	2.464×10^{-1}

xmu	t	s	und	utd	$gamma$
2	4.95E-01	1.98	0.248889	0.248889	1.00

Tabla 2: Parámetros de los cohesivos internos.

Donde; r_o es la densidad en T/mm^3 , en es la rigidez normal al plano del elemento cohesivo en MPa/mm , et es la rigidez en el plano del elemento cohesivo en MPa/mm , gic es la tasa de liberación de energía para el modo I en $MPa.mm$, $giic$ es la tasa de liberación de energía para el modo II en $MPa.mm$, xmu es el exponente del criterio de modo mixto, t y s es la resistencia pico de tracción y corte en MPa , und y utd son los desplazamientos últimos normales y tangenciales en mm , $gamma$ es el exponente adicional para la ley Benzeggagh - Kenane.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Fig. 5 se presenta la configuración de daño alcanzada a los 0.3 s de la simulación, tiempo en el cual se alcanza la deformada final del muro.

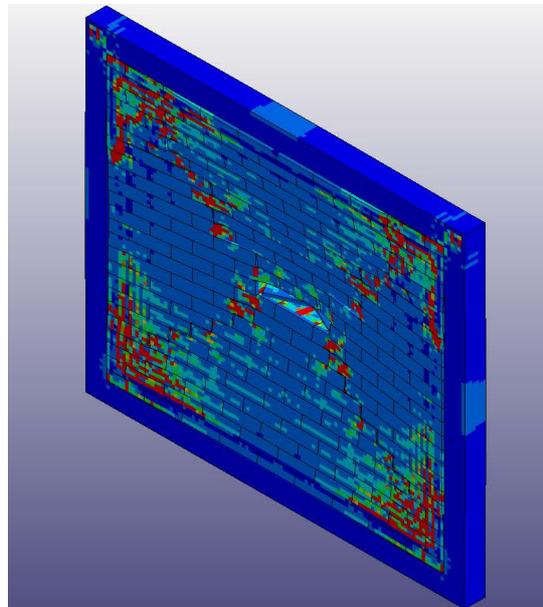


Figura 5: Daño final en modelo numérico.

El daño en el modelo se manifiesta de diferentes maneras, en los ladrillos modelados con **MAT_RHT*, [Borrvall y Riedel \(2011\)](#), se observa el daño del material en el parámetro D , que se incrementa hasta llegar a un valor de $D = 1$ con la deformación plástica acumulada. Una vez alcanzado $D = 1$ el modelo queda bajo la superficie residual, Fig. 4. Por otra parte el muro

presenta daños de deslizamiento y separación de interfases entre ladrillos y entre ladrillos y el marco perimetral. Los elementos cohesivos se erosionan una vez alcanzado el desplazamiento último tangencial o normal, und o utd , Tabla 2, lo que permite visualizar las zonas del muro donde se venció la adherencia y solo quedó el mecanismo de fricción para transmitir cargas. El estado final de los cohesivos se presenta en la Fig. 6. Se observa que en el centro del muro y en las diagonales las juntas entre ladrillos se ven muy dañadas. También se observan fallas en los cohesivos perimetrales aunque no alcanzan a desaparecer del todo lo cual evita que el muro se deslice respecto del marco, aunque sí se producen fallas de tracción, compatibles con lo observado experimentalmente.

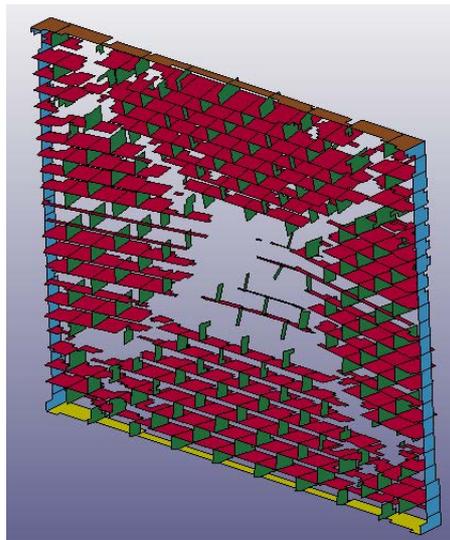


Figura 6: Daño final en elementos cohesivos.

La respuesta del muro ante la explosión presenta un comportamiento plástico sobre amortiguado, donde el muro no presenta un estado de vibraciones libres en la etapa final de la respuesta, esto se debe a que se degrada mucho la rigidez y el mecanismo de fricción entre ladrillos es importante. El desplazamiento en el tiempo de un nodo central del muro se observa en la Fig. 7.

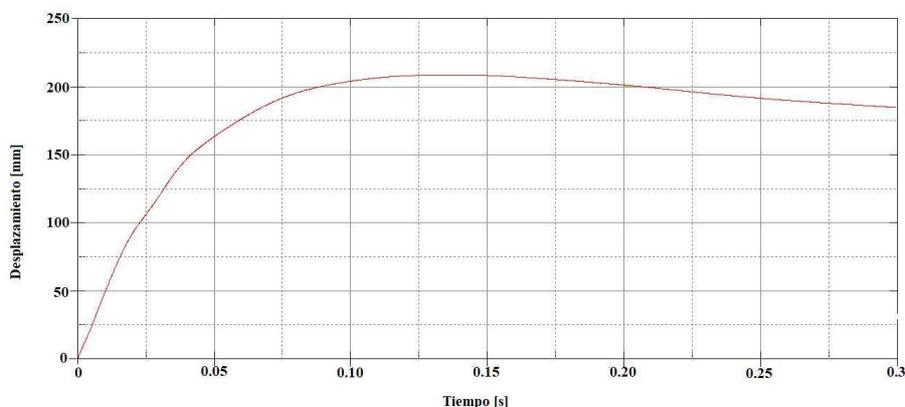


Figura 7: Historia de desplazamiento en nodo central.

La deformación final se presenta en la Fig. 8, donde se comparan las deflexiones medidas

experimentalmente con las obtenidas numéricamente sobre un eje vertical. En la Fig. 9 se presenta una vista frontal del modelo del muro, donde se observa la configuración de las fisuras y desprendimientos de material obtenido.

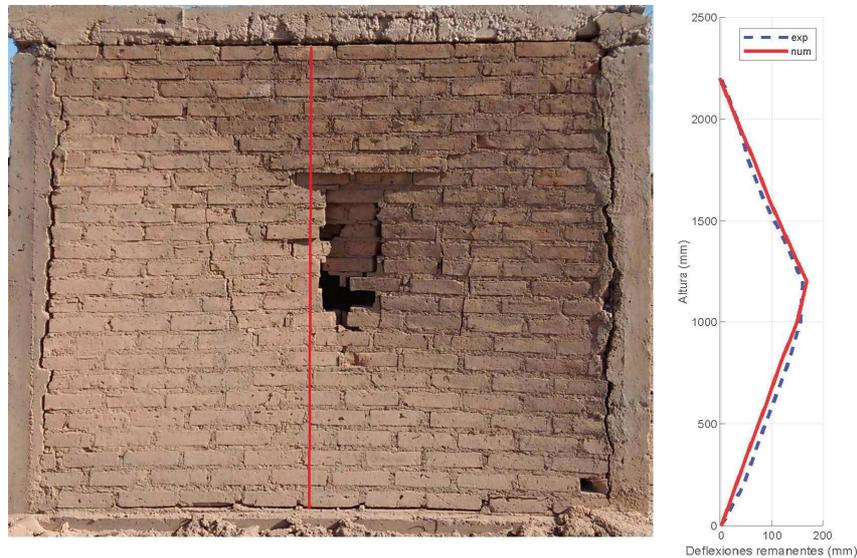


Figura 8: Comparación de desplazamientos experimental y numérico.

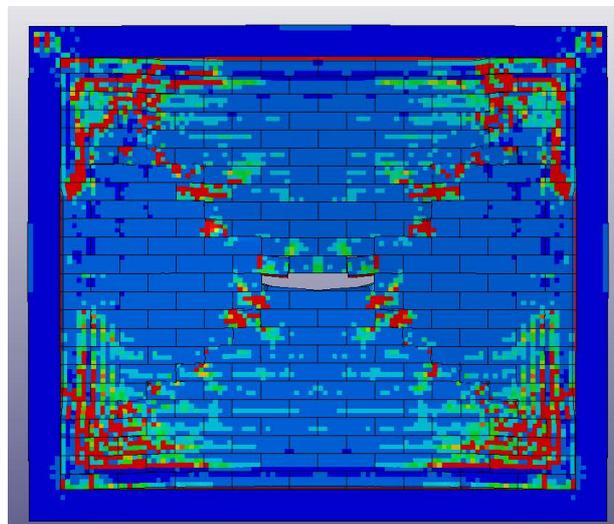


Figura 9: Daño final en modelo numérico.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realiza un estudio numérico referido a un muro de mampostería encadenada, expuesto una explosión equivalente a 5 kg de TNT a 1 m de distancia, y se contrastan los resultados obtenidos con resultados experimentales previos. Se observa que las deformaciones y la configuración del daño resulta ser muy parecida a la observada experimentalmente. Los elementos cohesivos utilizados para modelar el efecto de adherencia reproducen adecuadamente el daño observado y permiten distinguir en forma sencilla las zonas del muro que sufrieron

deslizamientos debido a la pérdida de cohesión. También se aprecia la importante cohesión que tiene el marco perimetral con el perímetro del muro. Se necesitó afectar las resistencias a corte y tracción de los cohesivos por un factor de 12, para anular deslizamientos. Esto permite al muro mantenerse confinado en su perímetro mientras sufre importantes desplazamientos. El mecanismo de fricción se activa al fallar la adherencia, obteniendo una repuesta más dúctil que en un muro no encadenado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Nacional de Cuyo y del CONICET.

REFERENCIAS

- Ahmad S., Elahi A., Pervaiz H., Rahman A., y Barbhuiya S. Experimental study of masonry wall exposed to blast loading. *Materiales de construcción*, 64(313):e007–e007, 2014.
- Badshah E., Naseer A., Ashraf M., y Ahmad T. Response of masonry systems against blast loading. *Defence Technology*, 17(4):1326–1337, 2021.
- Borrvall T. y Riedel W. The rht concrete model in ls-dyna. En *Proceedings of The 8th European LS-DYNA user conference*, páginas 23–24. 2011.
- Chen D., Wu H., y Fang Q. Simplified micro-model for brick masonry walls under out-of-plane quasi-static and blast loadings. *International Journal of Impact Engineering*, 174:104529, 2023.
- Codina R. y Ambrosini D. Experimental study of confined masonry walls under blast loading. *Shock Waves*, 32(3):261–272, 2022.
- Michaloudis G. y Gebbeken N. Modeling masonry walls under far-field and contact detonations. *International journal of impact engineering*, 123:84–97, 2019.
- Tomažević M. y Klemenc I. Seismic behaviour of confined masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(10):1059–1071, 1997.
- Wang C.z., Chen A.j., Li Z.q., Gong C.a., Wang S., y Yan W.m. Experimental and numerical investigation on penetration of clay masonry by small high-speed projectile. *Defence Technology*, 17(4):1514–1530, 2021.
- Zapata B.J. y Weggel D.C. Collapse study of an unreinforced masonry bearing wall building subjected to internal blast loading. *Journal of performance of constructed facilities*, 22(2):92–100, 2008.