

## REFUERZO DE CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA EXPUESTA A EXPLOSIONES ACCIDENTALES

### REINFORCEMENT OF A MASONRY BUILDING EXPOSED TO ACCIDENTAL EXPLOSIONS

Gabriel Aráoz<sup>a</sup>, Sergio Gutiérrez<sup>a</sup> y Bibiana Luccioni<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup> *Instituto de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, [garaoz@herrera.unt.edu.ar](mailto:garaoz@herrera.unt.edu.ar), [bluccioni@herrera.unt.edu.ar](mailto:bluccioni@herrera.unt.edu.ar), <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

<sup>b</sup> *CONICET*

<sup>c</sup> *CIMNE-IBER, <https://cimne-iber.com.ar>*

**Palabras clave:** explosión, mampostería, refuerzo, compuestos con fibra de carbono.

**Resumen.** En muchos casos es necesario readecuar construcciones industriales para que sean capaces de resistir acciones accidentales provenientes de explosiones originadas en las mismas plantas. En este trabajo se presenta la aplicación de distintos niveles de análisis a la verificación de una construcción con muros mampostería de bloques de hormigón sometida a explosiones accidentales y el diseño del refuerzo con materiales compuestos de matriz polimérica con fibra de carbono para soportar las solicitaciones de diseño con un determinado nivel de daño, pero resguardando la seguridad de las personas en el interior de la construcción. En esta primera etapa de diseño se utiliza un método dinámico simplificado basado en sistemas de un grado de libertad. La verificación del diseño utilizando una simulación dinámica explícita de la estructura, permite evaluar los márgenes de seguridad asociados al método dinámico simplificado. Los resultados muestran que el método simplificado conduce a resultados seguros y que el tipo de refuerzo planteado, si está adecuadamente diseñado, permite reducir el daño de los muros de mampostería.

**Keywords:** blast load, masonry, reinforcement, carbon fiber reinforced composites.

**Abstract.** In many cases, retrofit of industrial buildings to be able to withstand accidental actions from explosions originated in the same plants is required. This paper presents the application of different levels of analysis to the verification of a construction with masonry walls made of concrete blocks subjected to accidental explosions and the design of the reinforcement with carbon fiber reinforced polymeric matrix composite materials to withstand the design loads with a certain level of damage, but safeguarding the safety of the people inside the construction. In this first design stage, a simplified dynamic method based on one-degree-of-freedom systems is used. The verification of the design using explicit dynamic simulation of the structure allows the evaluation of the safety margins associated with the simplified dynamic method. The results show that the simplified method leads to safe results and that with a proper design, the proposed type of reinforcement allows reducing the damage to the masonry walls.

## 1 INTRODUCCIÓN

Normalmente, las construcciones en plantas industriales pueden estar expuestas a la acción de fuertes presiones provenientes de explosiones accidentales. Las construcciones con muros de bloques de hormigón sin armar (sin refuerzo o con escaso refuerzo) son muy comunes en la construcción de los edificios industriales. Este tipo de construcción carece de ductilidad y tiene baja resistencia a las cargas explosivas. Aun cuando se trate de muros no estructurales, su resistencia puede ser decisiva en el colapso o no de la estructura, ya que la redistribución de fuerzas puede hacer que estos se hagan cargo de la carga vertical de otros elementos estructurales colapsados. Además, aun cuando la estructura no colapse, el daño a los muros de mampostería puede ser la principal causa principal de lesiones y víctimas debido al peligro de escombros que salen despedidos (Chiquito et al. 2019). En los últimos años se han llevado a cabo muchos estudios para mejorar la resistencia de los muros de mampostería existentes. Hay muchas maneras de reacondicionar las paredes de mampostería para aumentar su resistencia a explosiones, incluidas muchas que se han desarrollado para resistir cargas explosivas típicas provenientes de explosivos de alta potencia, como los usados en ataques terroristas. Sin embargo, sólo un número limitado de estas modificaciones se ha considerado práctico para edificios sujetos a explosiones industriales, que normalmente tienen duraciones de carga explosiva mucho más largas que los explosivos de alta potencia (ASCE, 2010).

Los refuerzos resistentes a explosiones más utilizados para construcciones sujetas a explosiones industriales incluyen fijación de vigas de acero verticales a las paredes, construcción de una pared exterior resistente a explosiones, fuera de la pared de mampostería, y adhesión de material reforzado con fibras de alta resistencia, preferiblemente a ambas caras por el efecto rebote. Estos compuestos tienen alta resistencia a tracción en la dirección de las fibras, por lo que pueden aumentar significativamente la resistencia a flexión fuera del plano de los muros de mampostería sin armar a la vez que evitan el desprendimiento de fragmentos. Las ventajas adicionales de este método son que el refuerzo es relativamente discreto y el proceso no requiere mucha mano de obra. Tiene la desventaja de dar lugar a modos de falla frágiles cuando se despegan las láminas.

Si bien se ha estudiado mucho el refuerzo de estructuras de hormigón frente a cargas explosivas con distintos tipos de materiales compuestos con fibras (Siddika et al. 2020), los trabajos referidos a refuerzo de muros de mampostería son bastante escasos, generalmente se trata de trabajos experimentales, la mayoría de ellos referidos a refuerzo de muros de ladrillos cerámicos macizos (Tan and Patoary, 2009; Badshah et al. 2021) y pocos aplicados a refuerzo de mampostería de bloques de hormigón (Ehsani and Peña, 2009). Es aún más reducido el número de trabajos que abordan el estudio numérico de la respuesta (Ghaderi et al. 2015) y la interacción dinámica de la lámina con la mampostería (Maazoun et al. 2021).

El objetivo de este trabajo es la evaluación de un refuerzo con compuesto reforzado con fibras de carbono (CFRP) para mejorar la respuesta de muros de mampostería de bloques de hormigón frente a explosiones industriales. En primer lugar, se verifica la construcción existente y se diseña el refuerzo con un enfoque simplificado, elemento a elemento, utilizando un sistema de un grado de libertad equivalente. Luego, como verificación, se simula numéricamente con modelos 3D la construcción industrial sometida a una explosión accidental externa, en su estado inicial y una vez reforzada.

## 2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 2.1 Construcción analizada

En la Figura 1 se muestra un esquema de la estructura analizada consistente una construcción de mampostería de bloques huecos de hormigón sin armar con losa de hormigón armado

sometida a carga explosiva. En la misma figura se indican las dimensiones de la construcción analizada y la armadura principal. Esta construcción es similar a la analizada en [Aráoz et al. \(2023\)](#), pero este caso, salvo en las esquinas, los bloques no están llenos y no se dispone armadura de refuerzo de la mampostería.

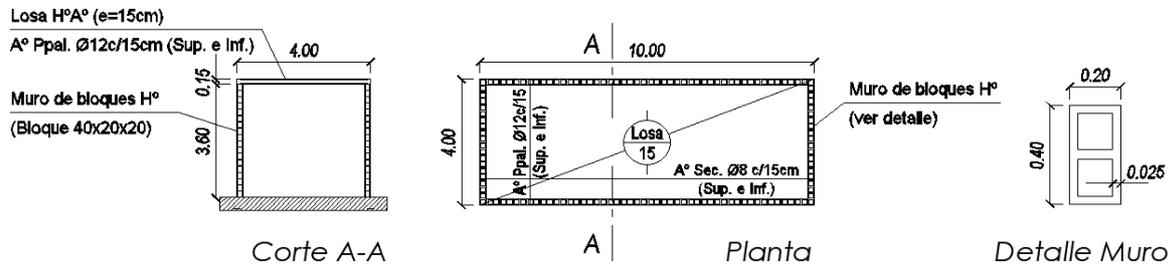


Figura 1: Estructura analizada.

## 2.2 Propiedades de los materiales

En la [Tabla 1](#) se presentan las propiedades de los materiales utilizados, incluyendo el factor de incremento dinámico DIF y factor de incremento de resistencia teniendo en cuenta que los códigos hacen referencia a la resistencia mínima esperable. Estos dos valores se usan sólo a los efectos del análisis elemento a elemento. En la misma se incluyen las propiedades del CFRP que se utilizará para el refuerzo de los muros. Son láminas de 0.331 mm de espesor con una deformación última nominal en tracción de 1.33%. Este límite, al igual que la resistencia última, generalmente se reducen por un factor de 0.95 para tener en cuenta la exposición a la intemperie ([ACI, 2017](#)).

Material	Densidad $\gamma$ [ $kg/m^3$ ]	Módulo de Elasticidad $E$ [MPa]	Coefficiente de Poisson $\nu$	Tensión de fluencia $f_y$ ó Resist. a compresión $f'_c$ [MPa]	DIF*	SIF*
Acero	7.9E3	200000	0.3	420	1.17	1.1
Hormigón	2.5E3	23500	0.2	25	1.19	1.0
Mampostería**	2.5E3	19000	0.2	15		
CRFP	5E3	225000**	0.15**	***3000 (2850)	---	---

\* Propiedades referidas a sección neta, \*\* Valor máximo, \*\*\* () Valor reducido por exposición.

Tabla 1: Propiedades de los materiales.

## 2.3 Carga explosiva

Se considera una acción explosiva dentro del rango usual en plantas de la industria petroquímica ([ASCE, 2010](#)) con una sobrepresión incidente pico de 10 kPa y una duración de 100 ms en la cara frontal de la construcción.

A los efectos de la simulación numérica, en [Aráoz et al. \(2023\)](#) se determinó numéricamente que esa acción es equivalente a la producida por una masa de TNT  $W = 20000 \text{ kg}$  de TNT ubicada a 370 m de la construcción.

Para obtener las presiones reflejadas que son las que realmente actúan sobre la construcción, se simuló numéricamente la explosión de 20000 kg de TNT utilizando el software AUTODYN ([ANSYS, 2022](#); [Aráoz et al. 2023](#)). En la [Tabla 2](#) se resumen los valores de sobrepresión reflejada máxima e impulso máximo en cada una de las superficies de la construcción.

Superficie	Muro frontal	Muros laterales	Muro posterior	Techo
Sobrepresión reflejada pico $p_r$ [kPa]	22.1	11.8	10.7	11.9
Impulso reflejado pico $i_r$ [kPa ms]	543.1	474.9	441.6	474.6

Tabla 2. Sobrepresión e impulso pico reflejados en las distintas superficies

### 3 VERIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DEL REFUERZO

#### 3.1 Introducción

En el diseño frente a cargas explosivas, se acepta que se alcance un comportamiento inelástico y, de hecho, es deseable por razones económicas. A medida que el elemento estructural incursiona en régimen inelástico, continúa absorbiendo la presión producida por la explosión mediante deformaciones inelásticas. El desempeño de un elemento estructural está basado en máxima deformación más que en el nivel de tensión. Se utilizan límites de deformación para asegurar que los elementos o las estructuras tengan una adecuada respuesta a las explosiones. La mayoría de los criterios de respuesta estructural publicados están expresados en términos de parámetros que son fácilmente comparables con la respuesta dinámica no lineal simplificada de modelos de uno o varios grados de libertad. Estos parámetros incluyen las rotaciones en articulaciones plásticas y las relaciones de ductilidad que están basadas en la deflexión pico de la componente. Los límites dependen del tipo de estructura o componente estructural, el material de construcción, la ubicación de la estructura y el nivel de protección requerido.

En el caso de construcciones de una planta de hormigón armado o mampostería con planta rectangular como la analizada, el enfoque usual para diseñar es considerar a la pared expuesta como un elemento flexional vertical desde la fundación al techo. El techo se diseña como un diafragma horizontal que se extiende entre las dos paredes laterales y las paredes laterales como paredes de corte que deben transmitir las cargas laterales y los momentos de vuelco a las fundaciones. Para cada elemento se utiliza un sistema de un grado de libertad equivalente (SDOF) que en el caso de los muros está dado por el desplazamiento normal al plano del punto central del muro. La ecuación de movimiento se escribe como:

$$K_{LM}M\ddot{u} + R(u) = F(t) \quad R = \text{Menor}(K u, R_u) \quad K_{LM} = K_M/K_L \quad (1)$$

donde  $M$  es la masa,  $u$  el desplazamiento,  $\ddot{u}$  la aceleración,  $R$  la fuerza interna,  $K$  la rigidez,  $R_u$  es la resistencia última y  $F(t)$  la fuerza actuante. Los factores de transformación  $K_M$  y  $K_L$  dependen de la carga y de las condiciones de apoyo pero también del tipo de comportamiento, elástico o plástico que determina la forma de la deformada. Estos factores están tabulados para distintas condiciones de apoyo y carga en la bibliografía (ASCE, 2010; Biggs, 1964).

En todos los casos se supone a los muros sometidos a una presión uniforme en el muro, variable en el tiempo (ver Figura 2), correspondiente a los valores de presión e impulso indicados en Tabla 2.

#### 3.2 Verificación de los muros de mampostería sin armar.

Se considera a los muros simplemente apoyados en su parte inferior y en la superior a la altura de las losas. Como se mostró en Aráoz et al. (2023), esta hipótesis resulta conservadora, pero es recomendable cuando no se puede asegurar que exista un adecuado anclaje de los muros a la fundación y a la losa superior. Se realiza el análisis de su comportamiento dinámico con un sistema de un grado de libertad equivalente (desplazamiento del centro) utilizando ábacos

(ASCE, 2010).

La resistencia flexional de la mampostería sin reforzar se puede calcular en base a la resistencia a fisuración de la mampostería (ACI, 2011). En el caso del muro frontal esta alcanza el 5% de la resistencia requerida. Como los muros no tienen armadura no cumplen con los requerimientos de ductilidad y deberían ser reforzados.

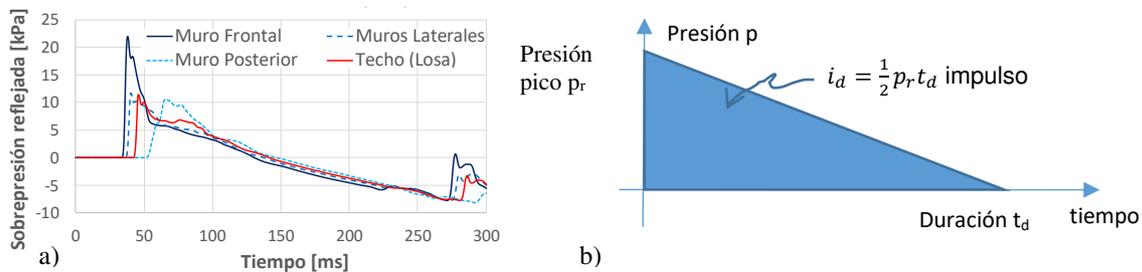


Figura 2: Variación de la presión en el tiempo. a) Solución numérica; b) Distribución simplificada

### 3.3 Diseño del refuerzo

Como alternativa de refuerzo, se plantea la adhesión a los muros de bandas de CFRP. Las mismas se disponen en tiras verticales, de fundación a techo, en ambas caras de los muros, de manera alternada. En la Figura 3a se puede ver la disposición de las tiras y otros detalles de refuerzo horizontal. Se adopta un ancho para las mismas y se calcula la separación de las tiras. Si bien los muros están expuestos a presiones e impulsos distintos, las bandas se diseñan para la pared frontal que es la más expuesta a la explosión y luego se usa la misma separación para el resto de los muros.

Al igual que en el caso de los muros sin reforzar, se considera a los mismos simplemente apoyados en su parte inferior y superior y se realiza el análisis dinámico con un sistema de un grado de libertad equivalente y el programa desarrollado.

Para evaluar la resistencia de la mampostería reforzada con CFRP se usa un enfoque basado en los lineamientos del ACI 440 (2017) considerando la sección compuesta equivalente y limitando las deformaciones de las láminas de CFRP al 70% de la deformación última para evitar el despegue de las mismas. El análisis basado en los desplazamientos máximos conduce a un refuerzo con bandas de 100 mm de ancho y 0.331 mm de espesor (una sola lámina) cada 400 mm, dispuestas en ambas caras de los muros de manera alternada, como se esquematiza en la Figura 3a.

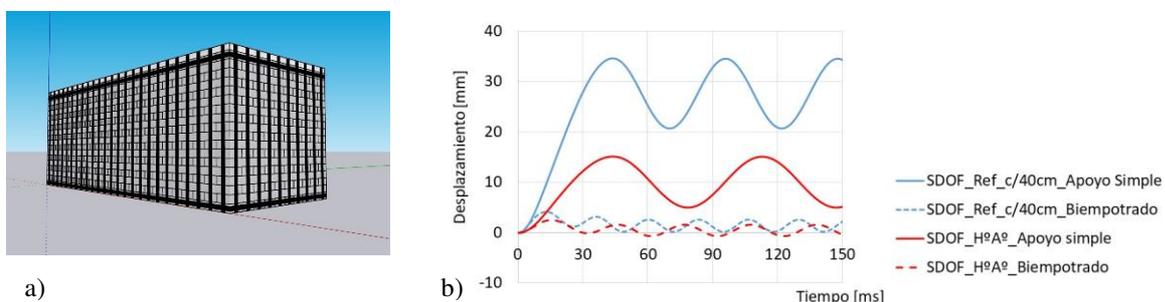


Figura 3: Refuerzo con CFRP. a) Disposición de las bandas de refuerzo; b) Respuesta dinámica de la mampostería reforzada

A modo de ejemplo, en la Figura 3b se muestra la variación del desplazamiento en el tiempo obtenida para el punto central del muro frontal. Se incluye también la correspondiente a la hipótesis de apoyos empotrados. En ambos casos, los desplazamientos y giros son menores que los máximos permitidos. Como comparación, se incluye también la respuesta de un muro de

bloques rellenos de hormigón y armados (Aráoz et al. 2023), para ambos tipos de condiciones de apoyo. La hipótesis de empotramiento reduce notablemente los desplazamientos. En ambos casos, los desplazamientos del muro con bloques llenos son menores que cuando se refuerza con CFRP, pero la diferencia es más marcada bajo la hipótesis de apoyos simples.

## 4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROBLEMA ACOPLADO

En esta sección se presenta la simulación mediante el software AUTODYN (ANSYS, 2022) de la acción de la explosión sobre la construcción de bloques de hormigón sin reforzar y luego del refuerzo utilizando un modelo acoplado 3D.

### 4.1 Modelo numérico

Aprovechando la simetría del problema, se modela la mitad de la estructura, inmersa en la misma malla de aire en donde se propaga la onda de presión producida por la explosión, ver Figura 4a. La malla de aire se modela con un procesador Euler FCT de 200 mm de lado lejos de la construcción y refinada (25 mm) alrededor de la construcción para poder manejar adecuadamente la interacción fluido estructura. En esa malla de aire, que tiene condiciones de borde flow-out, se mapean los resultados de la generación y propagación de la onda de presión debida a la detonación de 20000 kg de TNT a 370 m de la estructura, obtenidos con modelos más finos (Aráoz et al. 2023).

La losa del techo y los muros se modelan utilizando un procesador de Lagrange y 8 elementos sólidos 3D en el espesor, de 0.20x0.20m en el plano. Se utilizan hexaedros de 8 nodos e integración reducida (1 punto de integración). En el caso de los muros de bloques huecos de hormigón, sólo se utilizan las dos capas externas dejando hueco el interior y los tabiques internos de los bloques se simulan con elementos de cáscara planos de 4 nodos y un punto de integración en el plano y 3 en el espesor (Figura 4b). No se modelan las juntas de la mampostería, sino que se trabaja con un modelo homogéneo equivalente para el material. Las armaduras de la losa se modelan con elementos de barras con las secciones equivalentes conectados en los nodos a los elementos sólidos.

Para simular los refuerzos se utilizan elementos de cáscara unidos solidariamente a los elementos de los muros. Para ello se toman bandas de 200 mm de ancho y se reduce a la mitad el espesor de las mismas con el objeto de simular bandas de 100 mm.

Se restringen los desplazamientos en tres direcciones en la base de los muros y extremos inferiores de los refuerzos verticales y en el plano de simetría se establecen las restricciones correspondientes a la misma.

Se define la interacción de Euler Lagrange entre el aire y la losa y Lagrange-Lagrange entre los distintos elementos de la construcción y se considera la aceleración de la gravedad.

### 4.2 Modelos materiales

Para el hormigón se utiliza el modelo RHT (Riedel et al. 2009) con las propiedades de Tabla 1 y las disponibles en la librería de AUTODYN (ANSYS, 2022) para un hormigón de resistencia similar a la de la Tabla 1. En el caso de la mampostería de bloques se trabaja con el mismo modelo de hormigón, pero con la resistencia de la mampostería (Tabla 1) y se reduce a la mitad la resistencia a tracción ( $0.05 f'_c$ ) y al corte ( $0.09 f'_c$ ), teniendo en cuenta que las juntas tienen muy reducida resistencia a tracción y corte. Se utiliza un límite de erosión basado en una deformación máxima de 0.01 para el hormigón de la losa y 0.001 para la mampostería (Luccioni et al. 2013).

Para las armaduras se usa el modelo Johnson Cook, con las propiedades de Tabla 1, sin endurecimiento. Tanto el modelo RHT (hormigón) como el modelo Johnson Cook (acero)

consideran el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento del material.

Para las bandas de CFRP se utiliza un modelo elástico lineal con las propiedades elásticas de [Tabla 1](#) y falla dada por la deformación máxima que garantiza que las láminas no se despeguen de los muros (0.00751). Esa deformación se alcanza antes que la tensión última de las láminas.

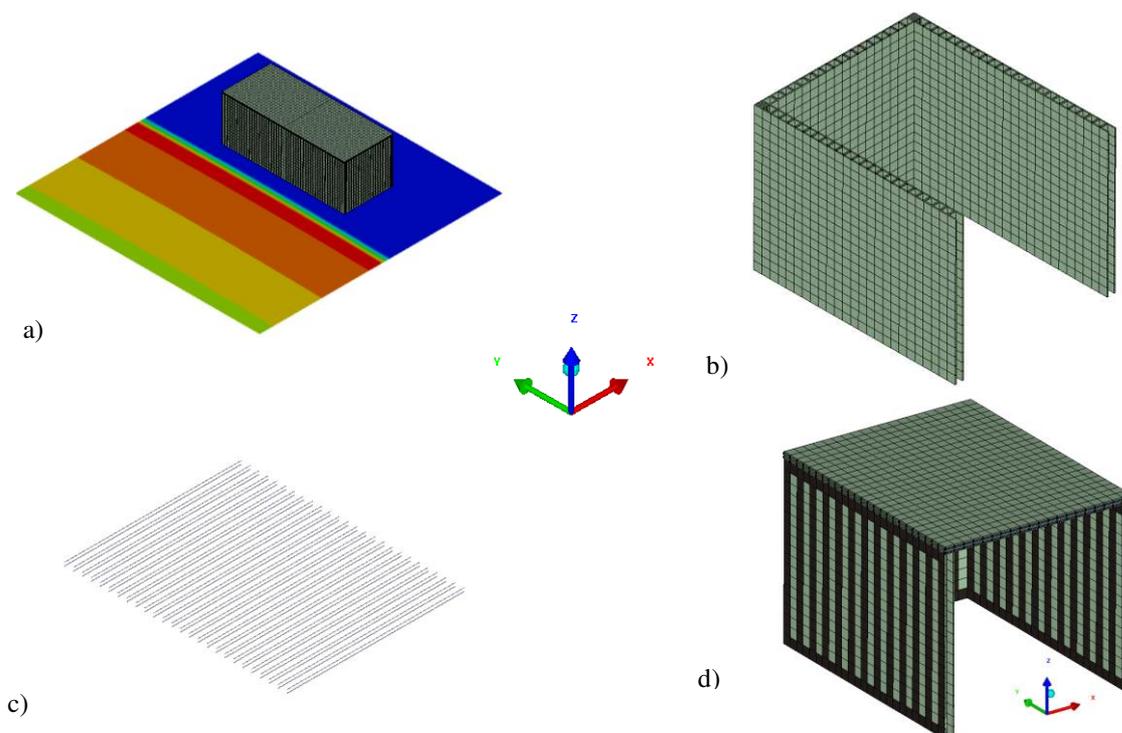


Figura 4: Modelo del problema acoplado. a) Construcción y onda de presión reflejada en el suelo; b) Bloques huecos de hormigón; c) Armaduras de la losa; d) Refuerzo con bandas de FRP

### 4.3 Análisis de los resultados

En las [Figura 5](#) y [6](#) se muestra el estado, luego de la acción de la onda explosiva (100 ms) en la construcción sin refuerzo y en la reforzada con CFRP respectivamente para su comparación. Se representa sólo la mitad de la construcción a los efectos de poder mostrar las deformaciones en el lado interno y las deflexiones que en las figuras están amplificadas con un factor 50.

En la [Figura 5](#) se puede ver el daño en la parte inferior y superior del muro frontal, como así también en la parte superior del muro lateral en la construcción sin refuerzo. Ese daño deja la losa prácticamente descalzada y la misma se daña en la parte superior de la esquina. El muro trasero prácticamente no evidencia daño, aunque tiene zonas inelásticas. La armadura de la losa permanece elástica ([Figura 5b](#)) pero parte de la losa plastifica. Se observa que se han desprendido parte de los muros y de la losa, lo que representa un peligro potencial que se suma al daño estructural evidenciando lo inadecuado de este tipo de construcción para resistir acciones explosivas.

La [Figura 6](#) muestra que en el caso de la construcción reforzada con las bandas de CFRP, el daño y las deformaciones se reducen notablemente restringiéndose a una pequeña zona en el plano de simetría del modelo. En la [Figura 6b](#), sin las bandas, se evidencia que los bloques no se han roto y tampoco la losa. La [Figura 6c](#) muestra las deformaciones equivalentes de las bandas, evidenciando que las mismas no exceden la deformación límite para asegurar que no se despeguen. Un tema importante en el trabajo conjunto de las láminas con la mampostería,

impidiendo que la misma pierda continuidad, es el tema de que las mismas estén adecuadamente ancladas a la fundación y a la losa para que, en caso de que se rompan los bloques, no se suelten dejando de colaborar. Las bandas horizontales juegan un papel importante manteniendo unidas las bandas verticales. En la Figura 7 se muestra, a modo ilustrativo, el estado final de la construcción cuando, por ejemplo, no se ponen bandas horizontales del lado interno y en el lado externo se dispone la banda horizontal a la altura de la losa en lugar de la altura de la fila de bloques inmediatamente inferior. Es claro que esa disposición no logra controlar adecuadamente el daño.

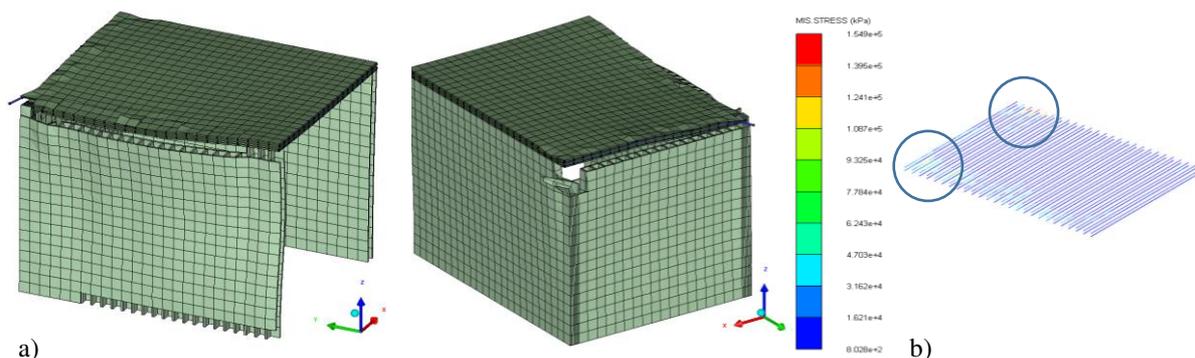


Figura 5: Resultados de simulación mampostería si reforzar (100ms). a) Configuración deformada (x50) y daño; b) Tensión de Von Mises en armaduras de la losa

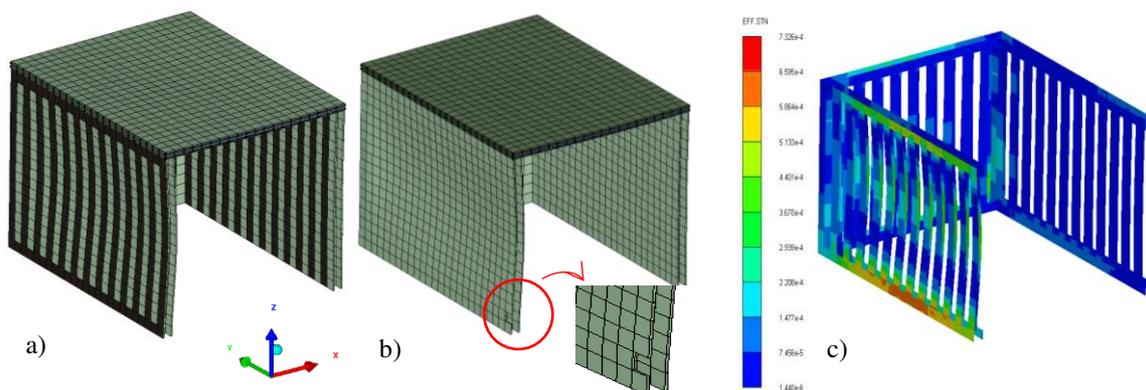


Figura 6: Resultados de simulación mampostería reforzada con CFRP (100ms). a) Configuración deformada (x50) y daño; b) Configuración deformada (x50) sin bandas; c) Deformaciones efectivas en las bandas.

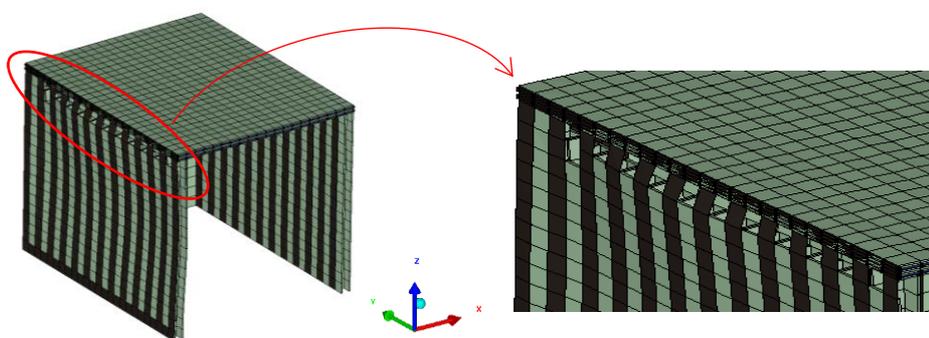


Figura 7: Daño mampostería reforzada con CFRP con detalles inadecuados. Configuración deformada (x50) (100ms)

En la **Figura 8** se presenta la evolución en el tiempo de las deflexiones de distintos puntos de la pared frontal obtenidas mediante el modelo 3D acoplado para el muro de bloques huecos sin refuerzos (**Figura 8a**) y el muro con refuerzo de CFRP (**Figura 8b**). En la **Figura 8b** se ha superpuesto la respuesta del punto con más deformación normal al plano del muro con bloques rellenos de hormigón y con armadura (**Aráoz et al. 2023**). Es claro el efecto del refuerzo con CFRP en el control de los desplazamientos laterales del muro que son justamente los que se utilizan para evaluar su desempeño, aunque no se logran desplazamientos tan reducidos como en el caso del muro de hormigón armado.

Si se comparan las curvas de la **Figura 8b** con las obtenidas para el muro mediante el análisis del muro frontal individualmente utilizando un SDOF equivalente (**Figura 3b**) se evidencia que la respuesta se parece más a la del modelo 3D acoplado, cuando se consideran los elementos empotrados en sus extremos, como trabajan en el modelo 3D. La respuesta simplificada correspondiente se ha superpuesto también en la **Figura 8b**. Se observa que se aproxima tanto en los desplazamientos pico como en la frecuencia, a la obtenida con el modelo 3D acoplado, salvo que el modelo simplificado (SDOF) tiene menos amortiguamiento.

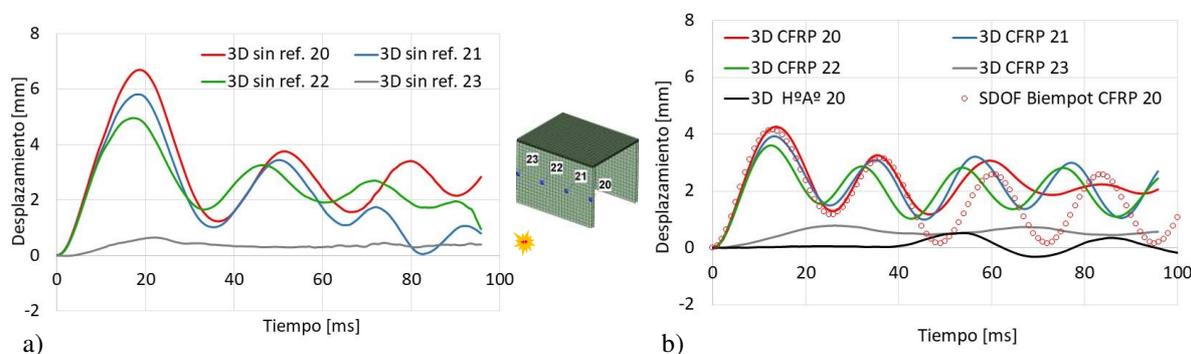


Figura 8: Variación de las deflexiones del muro frontal en el tiempo (desplazamiento  $x$ ). a) Construcción sin refuerzo; b) Construcción reforzada con bandas de CFRP.

## 5 CONCLUSIONES

Tanto el análisis simplificado (SDOF) como el análisis 3D acoplado, muestran que la mampostería de bloques de hormigón huecos no es adecuada para resistir ondas de presión provenientes de explosiones de la magnitud considerada en este trabajo. La baja resistencia a tracción, unida a la fragilidad, hace que el sistema falle con desprendimiento de fragmentos, constituyendo un peligro para los ocupantes.

La comparación de los resultados del análisis simplificado (SDOF) con los correspondientes a una simulación 3D del muro con refuerzo de CFRP muestra valores picos máximos de desplazamiento y frecuencias similares en ambos enfoques cuando se usan condiciones de borde similares. La consideración de apoyos simples y rigidez fisurada conduce a resultados conservadores. Si no se puede asegurar el anclaje de los muros a la losa y fundaciones, es preferible suponer apoyos simples. Las bandas de CFRP permiten reducir los desplazamientos y daño de los muros, manteniendo la integridad de los mismos. Se debe asegurar que las bandas no se desprendan debido a las grandes deformaciones, acciones climáticas o debido a la rotura de los bloques. Para garantizar esto último, es importante disponer adecuadamente bandas horizontales, que las bandas verticales lleguen a las fundaciones y se extiendan a modo de anclaje en la losa, cuestiones que fueron tenidas en cuenta en el modelo 3D.

El muro con bloques rellenos de hormigón y armado es más rígido y resistente que el muro hueco reforzado con CFRP, pero esta solución no es fácil de materializar en muros existentes. Por otro lado, aún en el caso de no poner refuerzos, el peligro está dado más por la fragilidad

que por las deflexiones que, en todos los casos, resultan menores a las admisibles en el modelo 3D.

Los resultados de este análisis son válidos para construcciones de la tipología y tamaño de la modelada, bajo explosiones que produzcan presiones del mismo orden. Por otro lado, se podría lograr un modelo más realista si se discretizan los bloques y el mortero, ya sea con elementos 3D o elementos de junta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (PIP 2020 11220200101621CO), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2020 1810) y a la UNT (PIUNT E727) por el apoyo económico brindado.

## REFERENCIAS

- ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2017.
- ACI 530-11 & ACI 530.1-11. Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures, 2011.
- American Society of Civil Engineer (ASCE). Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, 2010.
- ANSYS, AUTODYN Version 18.1 User's Manual, 2022.
- Aráoz, G., Gutiérrez, S. y Luccioni, B., Evaluación de una construcción industrial expuesta a explosiones accidentales. *Mecánica Computacional*, XL, 81-90, 2023.
- Badshah, E., Naseer, A., Ashraf, M., Ahmad, T., Response of masonry systems against blast loading. *Defence Technology*, 17(4): 1326-1337, 2021.
- Biggs, J.M., Introduction to Structural Dynamics. McGraw-Hill, 1964.
- Chiquito, M., López, L.M., Castedo, R., Pérez-Caldentey, A. and Santo, A.P., Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment. *Engineering Structures* 201: 109805, 2019.
- Ehsani, M. and Peña, C., Blast Loading Retrofit of Unreinforced Masonry Walls With Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics. *Structure Magazine* 16-20, 2009.
- Ghaderi, M., Maleki, V.A. and Andalibi, K., Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading by FRP and Spray on Polyurea. *Science Journal*, 36 (4): 462-476, 2015.
- Luccioni, B.M, Aráoz, G.F. and Labanda, N.A. Defining Erosion Limit for Concrete. *International Journal of Protective Structures*, 4(3):315-340, 2013.
- Maazoun, A., Matthys, S., Belkassam, B., Atoui, O. and Lecompte, D. Experimental study of the bond interaction between CFRP and concrete under blast loading. *Composite Structures*, 277: 114608, 2021.
- Octave Project Developers, GNU OCTAVE Version 6.2.0 Free software, User's Manual, 2021.
- Paz, M. and Leigh, W., Structural Dynamics: Theory and Computation. Kluwer Ac. Pub., 2006.
- Riedel, W., Kawai, N. and Kondo, K., Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials. *International Journal of Impact Engineering*, 36(2): 283–293, 2009.
- Siddika, A, Al Mamunb, A., Ferdous, W. and Alyousef, R. Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 111: 104480, 2020.
- Smith, P.D. and Hetherington, J.G., Blast and ballistic loading of structures. Butterworth-Heinemann Ltd., 1994.
- Tan, K.H. and Patoary, M. K. H., Blast Resistance of FRP-Strengthened Masonry Walls. I: Approximate Analysis and Field Explosion Tests. *J. Compos. Constr.*, 13: 422-430, 2009.