

EVALUACIÓN DE UNA CONSTRUCCIÓN EXPUESTA A EXPLOSIONES ACCIDENTALES

EVALUATION OF A CONSTRUCTION EXPOSED TO ACCIDENTAL EXPLOSION

Gabriel Aráoz^a, Sergio Gutiérrez^a y Bibiana Luccioni^{a,b}

^a *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, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

^b *CONICET*

Palabras clave: explosión, presión, análisis dinámico, hormigón armado, mampostería.

Resumen. Históricamente el diseño de construcciones resistentes a explosiones ha evolucionado desde la utilización de diagramas de iso-daño y el empleo de cargas estáticas equivalentes en conjunto con métodos de diseño estático convencionales, pasando por métodos dinámicos simplificados que tienen en cuenta las características dinámicas de la estructura y su ductilidad hasta llegar a un análisis dinámico acoplado de la onda de presión y su interacción con la estructura. Dependiendo de la etapa de diseño y el tipo de componente estructural, resulta conveniente combinar los distintos enfoques para llegar al diseño final. En este trabajo se presenta una aplicación de los distintos niveles de análisis al diseño de una construcción de mampostería armada sometida a explosiones accidentales. La verificación del diseño basado en un análisis dinámico simplificado utilizando una simulación dinámica explícita de la estructura, permite evaluar los márgenes de seguridad asociados al método dinámico simplificado. En el trabajo se obtienen numéricamente las solicitaciones correspondientes a un accidente de diseño y se dimensionan y verifican los elementos estructurales reforzados para soportar dichas solicitaciones con un determinado nivel de daño, pero resguardando la seguridad de las personas en el interior de la construcción.

Keywords: blast load, pressure, dynamic analysis, reinforced concrete, masonry.

Abstract. Historically, the design of explosion-resistant buildings has evolved from the use of iso-damage diagrams and the use of equivalent static loads in conjunction with conventional static design methods, passing through simplified dynamic methods that take into account the dynamic characteristics of the structure and its ductility until reaching a coupled dynamic analysis of the pressure wave and its interaction with the structure. Depending on the design stage and the type of structural component, it is convenient to combine the different approaches to arrive at the final design. This paper presents an application of the different levels of analysis to the design of a reinforced masonry construction subjected to accidental explosions. Verification of the design based on a simplified dynamic analysis using an explicit dynamic simulation of the structure, allows to evaluate the safety margins associated with the simplified dynamic method. In the work, the solicitations corresponding to a design accident are obtained numerically and the reinforced structural elements are dimensioned and verified to withstand said solicitations with a certain level of damage but protecting the safety of people inside the construction.

1 INTRODUCCIÓN

Normalmente, las construcciones en plantas industriales pueden estar expuestas a la acción de fuertes presiones provenientes de explosiones accidentales. Tanto para el diseño de construcciones nuevas como para la readecuación de construcciones existentes, se requieren la determinación de las sobrepresiones provenientes de los distintos escenarios, la evaluación de los requerimientos de desempeño y el diseño de la construcción o los refuerzos para soportar las cargas dentro de los límites de desempeño requeridos. En nuestro país no existe una reglamentación al respecto.

A lo largo de los años, se han ido desarrollando herramientas más avanzadas y potentes para el diseño y verificación de estructuras sometidas a cargas provenientes de explosiones. Dependiendo de la etapa de diseño y el tipo de componente estructural, resulta conveniente combinar los distintos enfoques para llegar al diseño final.

En cualquier caso, la primera etapa consiste siempre en la determinación de los escenarios de accidente y la caracterización de las acciones provenientes de los mismos que generalmente hacen referencia a presiones y su variación en el tiempo. Al respecto, conviene aclarar que, para el caso de explosivos químicos como el TNT, que normalmente se usa como referencia, existen tablas y gráficos para obtener dichas acciones en el caso de explosiones en campo libre y geometrías de carga sencillas, o se las puede simular con algunos hidrocódigos comerciales. Pero las características de las explosiones en aire pueden variar fuertemente dependiendo de la naturaleza de la fuente que genera la onda de presión. En las explosiones de combustible en aire, como la explosión de nubes de vapor, la duración de la fase positiva de la onda de presión es mucho mayor que en el caso de ondas de presión generadas por detonación de explosivos altamente condensados como el TNT (Baker et al. 1983; Cormie et al. 2009). Esto hace que el impulso correspondiente a este tipo de explosiones sea considerablemente mayor.

Una vez determinadas las acciones, la forma más sencilla de estimar el daño es mediante las denominadas curvas de igual daño (iso-damage curves) que se encuentran en la bibliografía (Smith and Hetherington, 1994) y que permiten determinar el nivel de daño a partir de los valores de presión e impulso incidente. En general, se trata de diagramas obtenidos de una vasta recopilación de resultados de daño en viviendas de mampostería y edificios, tanto a partir de ensayos experimentales como de observación de explosiones reales. La ventaja de estos diagramas es que son independientes del tipo de explosión. Si bien los diagramas de iso-daño han sido exitosamente utilizados en distintas aplicaciones (Luccioni et al. 2005; Luccioni y Ambrosini, 2012) para estimar el daño, debe notarse, sin embargo, que el daño sufrido por una estructura no puede determinarse únicamente a partir de los valores de presión e impulso. Es importante conocer también las características de los edificios impactados por las ondas de presión, en particular, las propiedades dinámicas de los materiales de construcción, la forma del edificio, su estructura portante, su forma y los distintos detalles constructivos (Cormie et al. 2009). Por otro lado, si bien son útiles para una estimación del daño no son aplicables directamente al diseño porque no permiten predecir el comportamiento estructural.

En el diseño frente a cargas explosivas, no es necesario limitar las tensiones de manera que la estructura se comporte elásticamente como en el diseño convencional. Se acepta que se alcance la tensión de fluencia y, de hecho, es deseable por razones económicas. 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. Justamente el objetivo del análisis dinámico frente a cargas explosivas es evaluar el comportamiento de la estructura y para ello, el método de análisis debe ser capaz de reproducir con suficiente precisión la deformación de la misma. Una práctica muy corriente es analizar la estructura usando un enfoque “elemento a elemento” (ASCE, 2010).

Manualmente se va siguiendo el camino de carga en la estructura, calculando las reacciones de un elemento que representan las cargas que actúan sobre los elementos en que se apoya. Este enfoque desacoplado, elemento a elemento, aproxima la respuesta dinámica de la estructura ya que no se considera la interacción dinámica entre los componentes fundamentales de la estructura. Esta simplificación conduce a resultados conservadores en el caso en que haya una diferencia de frecuencias de los elementos de por lo menos un factor de 2 (Biggs, 1964; Baker, 1983), pero no hay seguridad de que conduzca siempre a resultados conservadores. En general, se usa en combinación con modelos de análisis dinámico simplificados de los elementos estructurales, consistentes en sistemas de un grado de libertad equivalentes y modelos materiales muy simplificados, de tipo elasto-perfectamente plásticos, en conjunto con mecanismos plásticos que incluyen articulaciones plásticas para evaluar la carga de colapso. La precisión de la aproximación con sistemas de un grado de libertad depende de hasta qué punto se puede representar la variación de la deformación de la estructura en el tiempo con ese sistema. En general, se pueden obtener resultados suficientemente precisos para componentes estructurales como vigas, columnas, paneles, paredes, diafragmas, losas y tabiques.

Un análisis dinámico más completo consiste en la simulación del comportamiento dinámico de la estructura bajo las presiones generadas por la explosión mediante métodos numéricos como el método de elementos finitos. Erkmén (2018) compara este tipo de enfoque con el análisis elemento a elemento con sistemas equivalentes de un grado de libertad de una estructura metálica y concluye que despreciar la interacción entre elementos conduce a resultados poco conservadores. Sin embargo, no hay resultados coincidentes al respecto. Un análisis más realista aún consiste en analizar la interacción de la onda de presión con la estructura completa mediante hidrocódigos (Luccioni et al. 2004).

En este trabajo, se comparan los resultados de un análisis elemento a elemento mediante sistemas de un grado de libertad equivalente con los de una simulación acoplada fluido-estructura de una construcción industrial sometida a una explosión accidental externa.

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 de hormigón armada con losa de hormigón armado sometida a carga explosiva. Se indican también las dimensiones de la estructura analizada y la armadura principal.

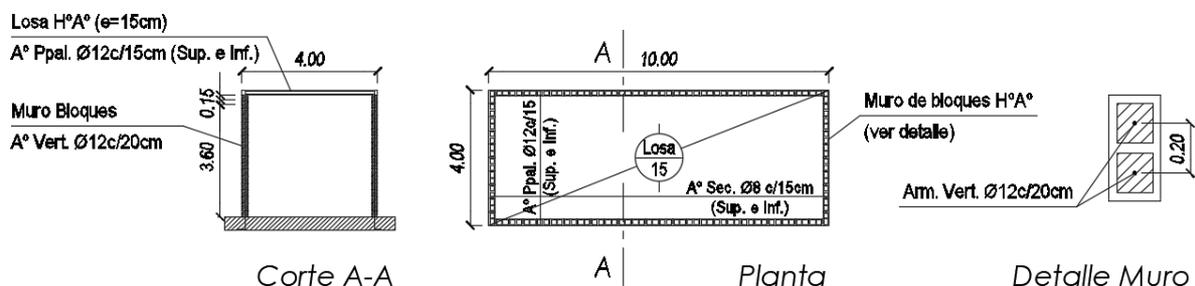


Figura 1: Estructura analizada.

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.

Material	Densidad γ [kg/m ³]	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Coefficiente de Poisson ν	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

*Sólo a los efectos del análisis elemento a elemento

Tabla 1: Propiedades de los materiales.

2.3 Carga explosiva

Para hacer posible la comparación entre los distintos métodos de análisis se toma como dato de partida una acción explosiva dentro del rango que puede ser soportado por una estructura como la descrita en los apartados 2.1. y 2.2 y que, además, es usual en plantas de la industria petroquímica (ASCE, 2010). La misma consiste en una sobrepresión incidente pico de 10 kPa y una duración de 100 ms en la cara frontal de la construcción.

3 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN ACTUANTE SOBRE LA CONSTRUCCIÓN

3.1 Introducción

Cuando el frente de onda arriba a un punto dado, comienza un viento transitorio que origina una presión dinámica proporcional al cuadrado de la velocidad del viento y a la densidad del aire detrás del frente de presión. Por último, cuando la onda de presión alcanza un medio más denso (tierra, agua, muro) se genera una onda reflejada (Baker et al. 1983) que es la que efectivamente actúa sobre la estructura. El valor del pico de presión reflejada es mayor que el de la presión incidente, depende del valor de la presión incidente y del ángulo con el que el frente de onda alcanza la superficie. La naturaleza de la superficie también tiene un efecto importante.

Los efectos del suelo pueden ser también importantes. Si el suelo actúa como una superficie lisa plana y rígida, cuando las explosiones ocurren sobre el suelo se puede duplicar el efecto de las mismas si la superficie no disipa energía. Típicamente, se considera un factor 1.8 de aumento de la energía de la explosión por efecto del suelo (Luccioni et al. 2007; Baker et al. 1983; Cormie et al. 2009). Si la explosión se produce a una cierta altura del suelo, a una cierta distancia de la fuente, la reflexión de la onda de presión sobre el suelo produce el efecto Mach y se incrementa el valor de la presión.

Por otro lado, si se analiza el efecto de una onda de presión sobre un edificio, se debe evaluar la acción sobre cada una de las superficies del mismo ya que la onda incide de manera distinta en las mismas y las alcanza en tiempos distintos (Cormie et al. 2009).

Por todas estas razones, al efecto de determinar las acciones se realiza una simulación numérica de la onda de presión.

3.2 Determinación de la carga explosiva

La herramienta numérica disponible para el cálculo sólo permite simular explosiones de explosivos químicos como el TNT, por ello se intenta encontrar la masa de TNT y la distancia a la que debe ubicarse para producir la presión y el impulso incidentes indicados en el punto. A partir de la presión incidente p_s se puede calcular la distancia escalada: $Z = d[m]/W[kg]$ y luego calcular la masa de TNT utilizando tablas, diagramas o ecuaciones (Smith and

Hetherington, 1994; Baker, 1983). Esto conduce a una masa $W = 20000 \text{ kg}$ de TNT ubicada a 370 m de la construcción. Los valores de presión e impulso tomados como datos de partida corresponden a una explosión originada de otra manera y probablemente a una distancia bastante menor, pero los valores estimados permitirán calcular las presiones reflejadas sobre las distintas superficies y también realizar la simulación de la onda y su interacción con la construcción. Seguramente los tiempos de arribo de la onda y la forma del frente de onda difieren de los de la carga equivalente de TNT pero, tratándose de una explosión lejana ese efecto puede despreciarse.

3.3 Simulación numérica de la onda de presión

Para obtener las presiones reflejadas se simuló numéricamente la explosión de 20000 kg de TNT utilizando el software AUTODYN (ANSYS, 2022). La explosión se simuló en una malla con simetría esférica muy refinada desde el instante de la detonación y luego, los resultados se mapearon en un modelo cilíndrico de 370 m de radio y 100 m de altura con una malla más gruesa (tamaño de malla = 200 mm) para simular la propagación de la onda expansiva hasta unos instantes antes de que llegue al borde del modelo. Finalmente, se mapearon los resultados en un modelo 3D de aire (tamaño de malla 200 mm) en el que se considera a la construcción como un volumen rígido a los efectos de obtener la presión actuante sobre la misma en las distintas caras. En este último caso, aprovechando la simetría del modelo, sólo se simuló la mitad del problema, aunque se espejaron las figuras para mostrar el problema completo. En la Figura 2 se muestran esquemáticamente los tres pasos mencionados.

Para el primer paso de la simulación numérica se utilizó una malla simétrica axial y un procesador de Euler Gudunov. La ecuación de estado del gas ideal se usó para el aire, mientras que la ecuación de estado de Lee-Tarver se usó para modelar tanto la detonación como la expansión de TNT junto con "Jones-Wilkins-Lee" (JWL EOS) para el explosivo sin reaccionar. Para simular una explosión en campo libre, se permitió el flujo de aire en todos los bordes del modelo. La detonación del explosivo se inició en el centro de la esfera. Tanto en el segundo como en el tercer modelo se utilizó un procesador Euler FCT para modelar el aire. En todos los modelos se impusieron condiciones de borde que permiten el flujo del aire y el TNT a través de los bordes, salvo en correspondencia con el suelo y en el plano de simetría del modelo 3D.

En la Figura 2d se muestran las curvas de variación de presión en el tiempo para puntos ubicados en las distintas caras de la construcción y en la Tabla 2 se resumen los valores de sobrepresión reflejada máxima e impulso máximo en los mismos puntos.

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

4 ANÁLISIS ELEMENTO A ELEMENTO

4.1 Esquema estructural

En este trabajo se realiza, un análisis elemento a elemento de los muros y las losas que permite diseñar los mismos o su refuerzo frente a las presiones provenientes de la explosión. 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.

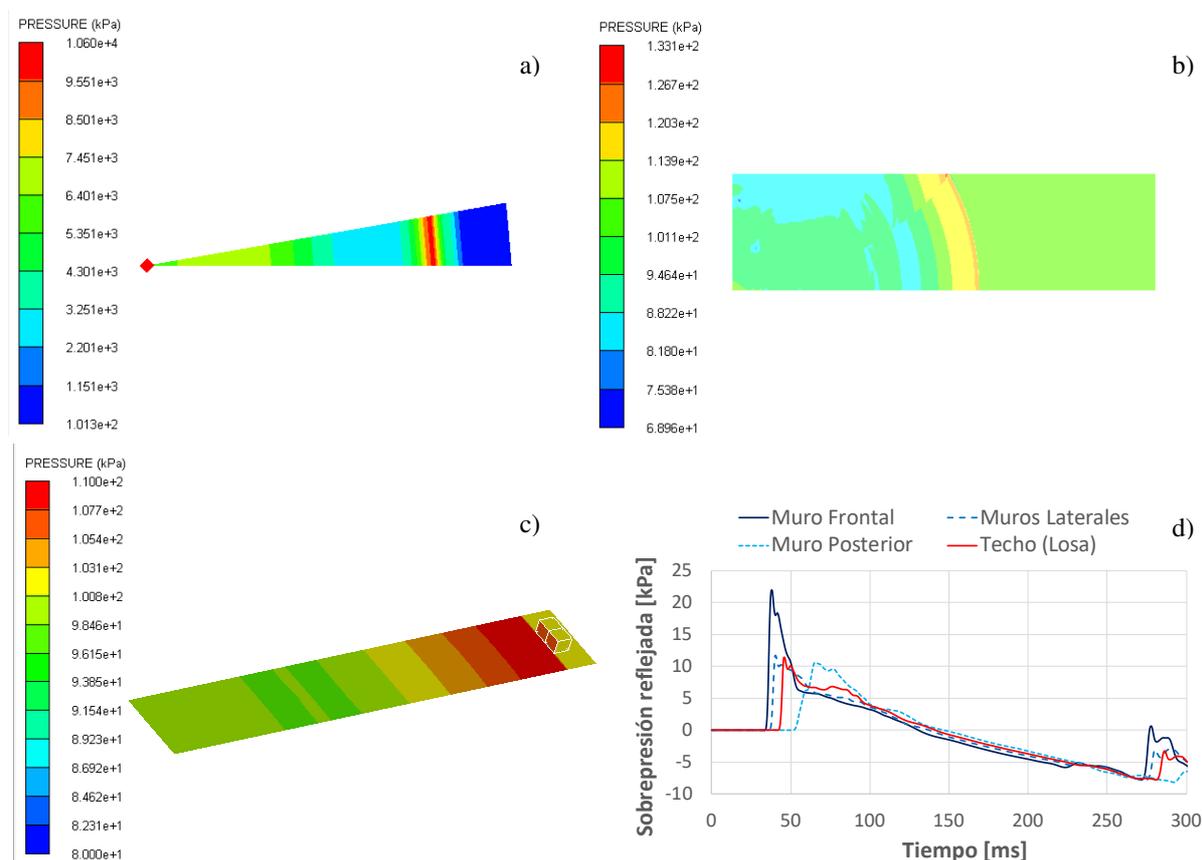


Figura 2: Etapas en la simulación de la explosión:
a) Detonación y primeros instantes de propagación; b) Propagación;
c) Reflexión sobre construcción; d) Curvas de sobrepresión reflejada

4.2 Sistema de un grado de libertad equivalente

Generalmente no se tiene en cuenta el amortiguamiento en el cálculo a explosiones porque el mismo no tiene tiempo de actuar en el corto lapso de duración de la acción. La ecuación de movimiento de un sistema inelástico de un grado de libertad se escribe entonces como:

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

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. La solución de esta ecuación puede hacerse de distintas formas según la complejidad de la función $F(t)$. El procedimiento para aproximar un componente estructural como un sistema de un grado de libertad (SDOF) equivalente se basa en la forma deformada bajo la carga aplicada y la equivalencia entre la energía de deformación del elemento y su aproximación mediante un SDOF. Esto permite obtener las propiedades equivalentes que deben usarse en la Ec. (1):

$$\text{Rigidez equivalente: } K_e = K_L K ; \text{ Masa equivalente: } M_e = K_M K \quad (2a,b)$$

$$\text{Fuerza equivalente: } F_e = K_L F ; \text{ Resistencia equivalente: } R_e = K_L R \quad (2c,d)$$

De esta manera la Ec.(1), puede escribirse para el SDOF equivalente como:

$$K_{LM}M\ddot{u} + R = F(t) \quad K_{LM} = K_M/K_L \quad (3)$$

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).

4.3 Integración de la ecuación de movimiento

La solución de la ecuación de movimiento (3) del SDOF para una carga variable en el tiempo puede obtenerse mediante integración numérica. En este trabajo se utiliza el método de aceleración lineal (Paz y Leigh, 2006). Si se llaman $\Delta\ddot{u}_i$, $\Delta\dot{u}_i$, Δu_i , a los incrementos de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente en el intervalo de tiempo Δt , entre el tiempo t_i y t_{i+1} , y se supone que la aceleración varía linealmente entre esos dos instantes de tiempo, integrando y acomodando los términos, la forma discreta de la ecuación (3) para el caso elástico puede escribirse como:

$$\bar{K}_i \Delta u_i = \Delta \bar{F}_i \quad \text{donde } \bar{K}_i = K_i + \frac{6K_{LM}M}{\Delta t^2} \text{ y } \Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + K_{LM}M \left(\frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i + 3\ddot{u}_i \right) \quad (4)$$

De donde puede obtenerse fácilmente Δu_i usando los valores de velocidad y aceleración calculados en el paso i . Para la solución se considera que los elementos tienen curvas de respuestas bilineales de tipo elasto-perfectamente plásticas. De manera que cuando se alcanza la resistencia última:

$$\bar{K}_i = \frac{6K_{LM}M}{\Delta t^2} \text{ y } \Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + K_{LM}M \left(\frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i + 3\ddot{u}_i \right) \quad (5)$$

En el caso de secciones de hormigón armado, teniendo en cuenta que el hormigón prácticamente no colabora en tracción, se suele calcular la rigidez K como el promedio entre la rigidez de la sección bruta de hormigón y la correspondiente a la sección fisurada, donde se considera el aporte de la armadura en las zonas traccionadas.

4.4 Aplicación al problema en análisis

La losa del techo está sometida a flexión debida a las cargas de peso propio y la presión producida por la explosión. Por sus dimensiones, se considera que trabaja en la dirección paralela al lado más corto y está apoyada en los muros. Los muros, según su orientación, están expuestos a flexión transversal al plano, flexión en el plano producida por la presión y carga axial proveniente de cargas permanentes y onda explosiva. Para la carga transversal se los considera apoyados en su parte inferior y en la superior a la altura de las losas. Para la carga en el plano se encuentran apoyados en la base y libres en la parte superior (voladizo) soportando la carga horizontal transmitida por la losa. Tanto en el caso de la losa como de los muros, se analizan distintas condiciones de apoyo, simple y empotrado. La presión se considera uniformemente distribuida en toda la superficie, con un pico igual al indicado en la Tabla 2 para cada superficie, y una variación triangular en el tiempo que produce el mismo impulso indicado en dicha tabla, que representa aproximadamente la fase positiva de la presión de la Figura 2d.

Se considera que las tensiones de tracción son soportadas por las armaduras. Para calcular la rigidez fisurada y el momento último de las secciones fisuradas de hormigón armado se utilizan las expresiones basadas en el equilibrio de la sección fisurada (CIRSOC 201, 2005).

Para el análisis dinámico se utiliza un código simple desarrollado en GNU OCTAVE (2021) que permite integrar la ecuación de movimiento teniendo en cuenta las cargas cuasi-estáticas

previas para encontrar los desplazamientos máximos en el sentido de la presión y en el sentido contrario, que luego se compararán con los obtenidos de la simulación del problema completo acoplado.

5 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROBLEMA ACOPLADO

Aprovechando la simetría del problema, se modela la mitad de la estructura, inmersa en la misma malla de aire que se utiliza para el tercer paso de la simulación de las presiones, ver Figura 3. La losa del techo y los muros se modelan utilizando un procesador de Lagrange y 8 elementos sólidos 3D en el espesor, de $0.20 \times 0.20 \text{m}$ en el plano. Se trata de hexaedros de 8 nodos e integración reducida (1 punto de integración). Las armaduras se modelan con elementos de barras con las secciones equivalentes conectados en los nodos a los elementos sólidos. Se restringen los desplazamientos en tres direcciones en la base de los muros 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 los apoyos.

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. Para las armaduras se utiliza 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.

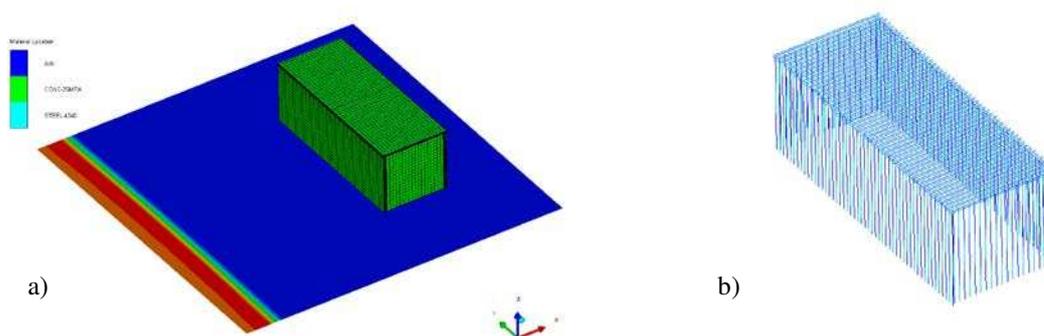


Figura 3: Modelo del problema acoplado. a) Construcción y onda de presión reflejada en el suelo; b) Armaduras

En la Figura 4a se muestran las deformaciones plásticas efectivas luego de la acción de la onda explosiva. 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 la figura están amplificadas con un factor 100. Se puede ver que hay partes plastificadas en el centro de las caras internas de los muros y externamente en los extremos de los mismos, en correspondencia con las zonas traccionadas del hormigón. De manera similar ocurre en la losa del techo, pero en este caso las deformaciones en la zona central (cara inferior) son mayores. En todos los casos las deformaciones plásticas son reducidas. En la Figura 4b se puede ver que las tensiones de von Mises en las armaduras no alcanzan la fluencia, pero es claro que la zona más solicitada corresponde a la curva de las armaduras del muro que siguen hasta la losa.

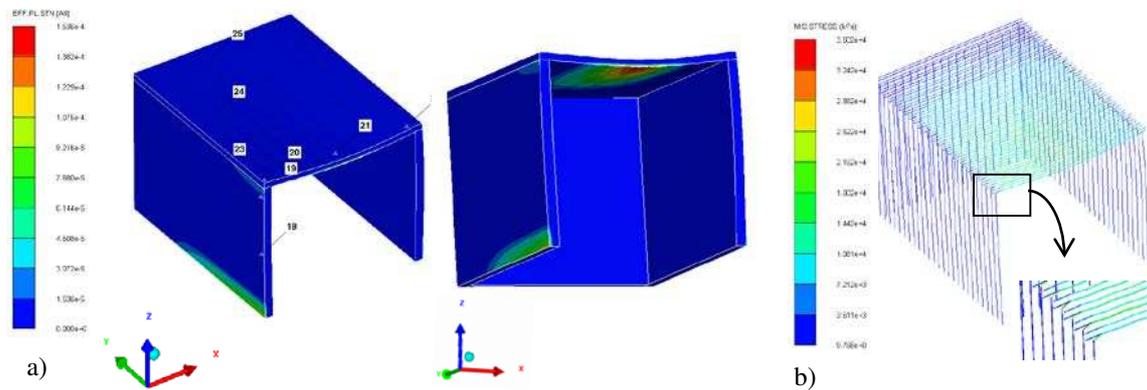


Figura 4: Resultados de simulación: a) Deformaciones plásticas efectivas por efecto de la explosión (deformación amplificada x100); b) Tensiones de Von Mises en armaduras.

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la [Figura 5](#) se compara la evolución en el tiempo de las deflexiones del centro de la pared frontal y del centro de la losa obtenidas mediante el modelo 3D acoplado y el análisis del muro y la losa individualmente utilizando SDOFs equivalentes, con distintas condiciones de apoyo y con diferentes hipótesis en cuanto a la rigidez. Las curvas correspondientes a las simulaciones acopladas están corridas en el tiempo una cantidad igual al tiempo que demora la onda de presión en llegar a las distintas superficies para que sean comparables con las del análisis elemento a elemento donde la acción empieza en $t=0$. Es claro que, en ambos casos, la respuesta se parece más al del sistema acoplado cuando se consideran los elementos empotrados en sus extremos como trabajan en el modelo 3D. En el caso del muro, que prácticamente no tiene deformaciones plásticas, las soluciones de ambos métodos aproximan más los picos positivos y frecuencias cuando se considera la rigidez inicial no fisurada en el análisis simplificado, mientras que en el caso de la losa, que sí se fisura, la solución se aproxima más a la del modelo acoplado cuando se considera una rigidez promedio.

7 CONCLUSIONES

La comparación de los resultados del análisis simplificado, elemento a elemento con SDOF equivalente con los correspondientes a una simulación 3D no lineal acoplada, muestra que para los valores picos de desplazamiento y frecuencias se obtienen valores similares en ambos enfoques cuando se usan condiciones similares. La consideración de apoyos simples y rigidez fisurada conduce a resultados conservadores en cuanto a los máximos desplazamientos esperados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para que el sistema trabaje como empotrado se requiere que las armaduras del muro estén debidamente ancladas en la losa. Si no se puede asegurar dicho anclaje es preferible suponer apoyos simples.

En el caso del muro, los picos negativos (desplazamiento en sentido contrario a la dirección de la presión) son subestimados en el enfoque simplificado, probablemente porque no se considera la fase de succión de la onda de presión. Los desplazamientos en sentido contrario al de la presión son importantes, por lo que conviene disponer armadura simétrica para controlar adecuadamente el desplazamiento en ambos sentidos.

A diferencia de lo observado por otros investigadores para estructuras metálicas, en el caso de esta construcción de mampostería y hormigón armado, no se evidencia un efecto importante de la interacción entre las deformaciones de los elementos en los desplazamientos de los mismos bajo la carga explosiva.

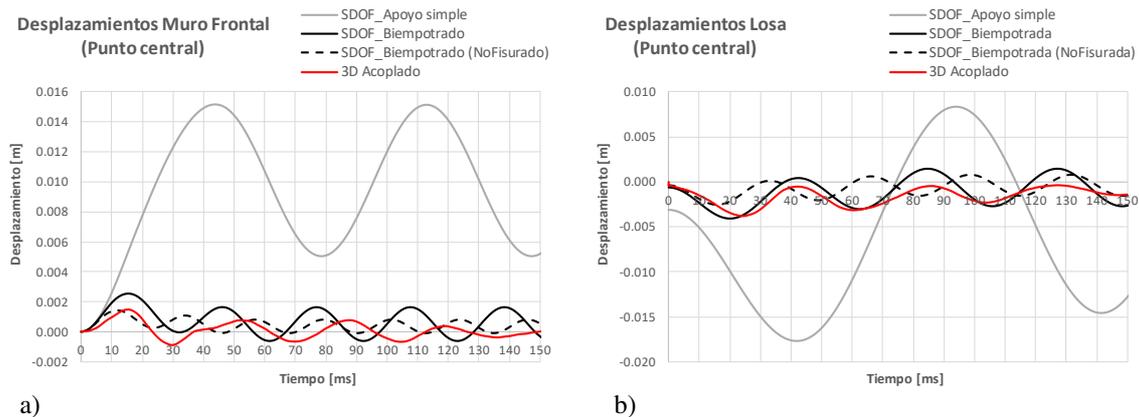


Figura 5: Variación de las deflexiones en el tiempo:
a) Desplazamiento en x en muro frontal; b) Desplazamiento en z en losa.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- ANSYS, AUTODYN Version 18.1 *User's Manual*, 2022.
- Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J. and Strehlow R.A., *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier Science Pub Co, 1983.
- Biggs J.M., *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, 1964.
- CIRSOC 201, *Reglamento Argentino de estructuras de hormigón*, INTI, 2005.
- Cormie D., Mays G. and Smith P., *Blast Effects on Buildings*, 2nd Ed. ICE Publishing, 2009.
- Erkmen, B., Comparison of blast analysis methods for modular steel structures. *İMO Teknik Dergi*, 29(2):8253–8277, 2018.
- Luccioni B., Ambrosini R. and Danesi R., Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, 26(1):63–71, 2004.
- Luccioni B., Ambrosini R. and Danesi R., Blast load assessment using Hydrocodes. *Engineering Structures*, 28(12):1736–1744, 2006.
- Luccioni B., Ambrosini R. and Danesi R., Blast load assessment using Hydrocodes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings*, 158(1), 1–12, 2005.
- Luccioni B. and Ambrosini R., Buildings protection against accidental explosions in petrochemical facilities. *Advances in Protective Structures Research*, Francis & Taylor Group, ISBN 978-0-415-64337-5, 195–220, 2012.
- 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 Academic Publishers, 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.
- Smith P.D. and Hetherington J.G., *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth-Heinemann Ltd., 1994.
- Task Committee on Blast-Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers, *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities*, 2nd Edition. American Society of Civil Engineer (ASCE), 2010.