

EFFECTO DE EXPLOSIONES EXTERNAS SOBRE TANQUES DE COMBUSTIBLE

EFFECT OF EXTERNAL EXPLOSIONS ON OIL STORAGE

Fátima B. Rodríguez Salinas^a, Bibiana Luccioni^{a,b} y Mariano P. Ameijeiras^c

^a *Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S. M. de Tucumán, Argentina, frodriguezsalinas@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

^b *CONICET, Godoy Cruz 2290, C1425FQB CABA, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar/>*

^c *FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba e Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT UNC-CONICET), Córdoba, Argentina, m.ameijeiras@unc.edu.ar*

Palabras clave: tanques, ondas explosivas, interacción fluido-estructura, simulación multifísica.

Resumen. La evaluación de la integridad de los tanques frente a explosiones es de suma importancia debido al impacto económico y ambiental que puede tener su colapso en estas situaciones. En este trabajo se presenta el análisis acoplado de un tanque sometido a explosiones mediante un programa multifísica con integración explícita. El estudio parte de la modelación de la detonación de la carga explosiva, considera la propagación de la onda de presión en aire y la interacción con las paredes del tanque. Para validar el modelo, se comparan presiones, desplazamientos y modos de pandeo del tanque obtenidos en este trabajo con los registrados en ensayos. Como resultado del análisis, se obtiene la distribución espacial de presiones en altura y alrededor del tanque, producto de la interacción de la onda explosiva con el mismo. Se concluye que la flexibilidad de la estructura prácticamente no influye en los valores de presión resultante sobre el tanque. Por otro lado, los resultados del análisis acoplado son similares a los del análisis desacoplado con simplificación en la distribución de la carga.

Keywords: tanks, blast waves, fluid-structure interaction, multiphysics simulation.

Abstract. The integrity evaluation of the tanks against blast loads is relevant due to the economic and environmental impact that their collapse can have in these situations. The coupled analysis of a tank subjected to explosions with a multiphysics program with explicit integration is presented in this paper. The study starts from the modeling of the detonation of the explosive charge, considers the propagation of the pressure wave in air and the interaction with the tank walls. To validate the model, pressures, displacements and tank buckling modes obtained in this paper are compared with those recorded in tests. The spatial distribution at height and around the tank of pressures resulting from the interaction of the explosive wave is obtained. It is concluded that the flexibility of the structure practically does not influence the resulting pressure values on the tank. On the other hand, the results of the coupled analysis are similar to those of the uncoupled analysis with simplification in the load distribution.

1 INTRODUCCIÓN

Generalmente, el almacenamiento de petróleo y derivados se realiza en tanques verticales de acero que usualmente no están aislados sino formando grupos, “granjas de tanques”, conectados por tuberías (Myers, 1997). Estas estructuras resultan expuestas a acciones naturales como viento y sismo, y también a accidentes propios de la industria petroquímica como fuego y explosiones.

En las últimas décadas se han registrado en todo el mundo numerosos accidentes en la industria del petróleo que han afectado a tanques de almacenamiento de combustible. Tales accidentes pueden producir daños importantes en las personas, en las estructuras mismas y en el medio ambiente con las consiguientes pérdidas económicas. Es importante preservar la integridad y funcionalidad de la infraestructura frente a este tipo de acciones.

Básicamente existen dos maneras de abordar el análisis de tanques sometidos a explosiones externas cercanas. Una, la más simplificada, consiste en someter a los mismos a presiones variables en el tiempo y el espacio equivalentes a las producidas por la fuente explosiva actuando sobre una estructura rígida (Duong et al., 2012b; Godoy y Ameijeiras, 2023) y la otra forma consiste en realizar un análisis multifísica donde se contemple de manera acoplada la fuente de la explosión y la estructura (Duong et al., 2012a; Mittal et al., 2014; Lu et al., 2019; Wang et al., 2022; Lai et al., 2021).

El presente trabajo presenta un análisis acoplado del efecto de explosiones en un tanque a escala reducida que fue ensayado experimentalmente por otros autores. Los objetivos del estudio son:

- Evaluar la distribución de presiones resultantes en la superficie del tanque, producto de la interacción de la onda de presión con el mismo y comparar con las distribuciones simplificadas, constantes en altura e independientes de la flexibilidad del tanque, que normalmente se utilizan en los análisis desacoplados.
- Evaluar el efecto del acoplamiento sobre la respuesta del tanque frente a explosiones.

Para el análisis se considera una carga de TNT equivalente que produce los mismos valores de presión e impulso incidentes registrados en los ensayos. La simulación se realiza con un código de multifísica con integración explícita en el tiempo de las ecuaciones del problema.

2 PROBLEMA ANALIZADO

El estudio experimental de referencia consiste en un tanque de acero inoxidable AISI 304 de escala reducida de diámetro $D = 250$ mm, altura $H = 250$ mm y espesor $h = 0.1$ mm ensayado bajo cargas explosivas (Duong et al., 2012a). En los ensayos se registraron las presiones e impulsos debidos a la acción explosiva (Duong et al., 2012a) y la configuración deformada, modos de pandeo y daño del tanque (Duong et al., 2012b).

Cuando la onda de presión incide sobre el tanque se produce una reflexión de la misma que da lugar a un aumento de los valores de las presiones e impulsos reflejados respecto de los incidentes. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de la explosión analizada en este trabajo medidos por Duong et al. (2012b). P_i es la sobrepresión (diferencia con la presión atmosférica) máxima incidente, I_i es el impulso por unidad de área máximo incidente, t_{i+} es la duración de la fase positiva de la onda incidente, P_r es la sobrepresión máxima reflejada, I_r es el impulso por unidad de área máximo reflejado y t_{r+} es la duración de la fase positiva de la onda reflejada. Los valores de presión e impulso reflejados fueron medidos sobre una superficie rígida.

Parámetro	
P_i [kPa]	238
I_i [Pa s]	6.74
t_{i+} [ms]	0.106
P_r [kPa]	780.8
I_r [Pa s]	20.7
t_{r+} [ms]	0.087

Tabla 1: Características de la onda de presión en los ensayos experimentales (Duong et al., 2012b).

Godoy y Ameijeiras (2023), utilizaron el ensayo descrito para validar sus modelos de elementos finitos desacoplados. Realizaron un análisis dinámico con el programa ABAQUS Explicit. Modelaron al tanque con elementos de cascara de 1.57 mm de lado y 5 puntos de integración. Adoptaron una imperfección inicial en la geometría de forma coincidente con el primer modo de pandeo obtenido de un análisis de bifurcación lineal y con amplitud igual al espesor de la cáscara.

Supusieron una distribución de presiones variable en el tiempo de acuerdo con la Ec. (1) y la distribución espacial representada en la Figura 1, que considera la presión constante en la altura.

$$p_r(t) = P_r \left(1 - t/t_{r+}\right) e^{-1.43t/t_{r+}} \quad (1)$$

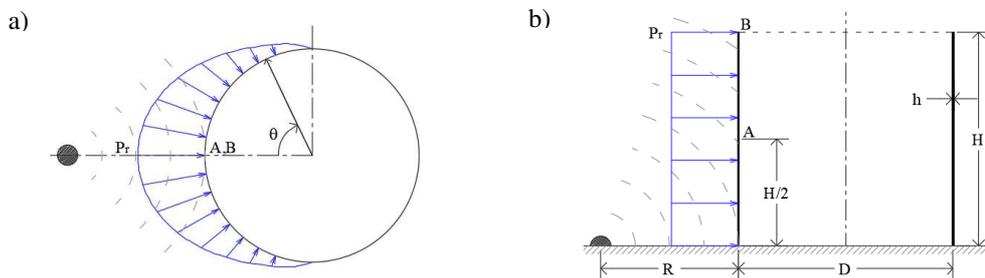


Figura 1: Distribución de presiones (Godoy y Ameijeiras, 2023). a) Circunferenciales; b) En altura

3 MODELO NUMERICO ACOPLADO

Para la simulación numérica de los ensayos experimentales realizados por Duong et al. (2012a) y su comparación con los resultados del modelo de elementos finitos (FEM) presentado por Godoy y Ameijeiras (2023), se utilizó el programa multifísica explícito AUTODYN incluido dentro de ANSYS Mechanical 2022 R2.

El modelo incluye el aire en donde se detona la carga explosiva, la propagación de la onda en el entorno y su interacción con el tanque.

3.1 Modelación de la explosión

Se determinó una masa equivalente de TNT correspondiente a la burbuja explosiva usada en los ensayos experimentales. Para explosiones en aire sobre el suelo, la presión incidente y el impulso específico por unidad de masa

$$i_s = I_s/W^{1/3} \quad (2)$$

dependen de la distancia escalada:

$$Z = R/W^{1/3} \quad (3)$$

donde R es la distancia al centro de la masa explosiva y W es la masa en kg de TNT del mismo. Utilizando ábacos (Smith y Hetherington, 1994), se estimó la distancia escalada correspondiente a la presión incidente indicada en Tabla 1 y el impulso específico por unidad de masa correspondiente a esa distancia escalada. Luego, utilizando las ecuaciones (2) y (3), se calcularon la masa W de TNT correspondiente al impulso indicado en Tabla 1 y la distancia al explosivo R , respectivamente. Partiendo de los valores calculados a partir de los ábacos, se ajustaron los valores de W y R mediante simulaciones numéricas sucesivas del problema para llegar a los valores de las presiones e impulsos incidentes reportados por (Duong et al. 2012b) para llegar a $W = 0.45g$ de TNT y $R = 16cm$.

Por una cuestión de precisión y eficiencia computacional, teniendo en cuenta que el problema de la explosión de una carga explosiva semiesférica sobre el suelo presenta simetría axial mientras la onda de presión no encuentre ningún obstáculo, el análisis completo se llevó a cabo en 3 etapas (Figura 2).

En la primera etapa (Figura 2a), se simuló la detonación de la masa explosiva y su propagación en un pequeño cilindro de aire alrededor de la misma. Se usó un modelo axial simétrico que representa un cilindro de aire en el que está inmerso un cilindro de TNT de radio 4.44 mm y altura 4.44 mm con el punto de detonación en el centro de la base. Se generó una malla de 120 x 120 elementos de un procesador Euler que se densificó en la zona del explosivo de tal manera que el TNT ocupaba 20 x 20 elementos de 0.222 mm de lado. Con este modelo se simuló desde el momento de la detonación hasta unos instantes antes de que la onda de presión alcance el borde de la malla de aire.

En la segunda etapa (propagación) (Figura 2b), se usó un modelo axial simétrico con un procesador Euler FCT (Flux-corrected transport) que representa un cilindro de aire. El procesador utilizado en esta etapa sólo permite trabajar con un material. El tamaño de la malla en esta etapa (0.5 mm de lado) fue considerado según criterio de Luccioni et al. (2006). Los resultados de la primera etapa de generación fueron mapeados en este modelo. Este procedimiento, que se puede hacer mediante el mismo programa, consiste en pasar los resultados de las variables de estado del primer modelo al subdominio espacial del segundo modelo en correspondencia con el mismo (ver Figura 2b), como condiciones iniciales de la segunda etapa de análisis. Se corrió el segundo modelo hasta unos instantes antes de que la onda de presión alcance el borde del modelo que correspondería a la llegada de la onda de presión al tanque, momento en el que problema pierde simetría axial.

En la tercera etapa (interacción) (Figura 2c), se modeló un prisma rectangular de aire con un procesador Euler FCT densificando la malla en correspondencia con la zona donde se ubica el tanque. En este caso, se hizo un análisis de sensibilidad al tamaño de los elementos teniendo en cuenta, además, que, para modelar adecuadamente la interacción con el tanque, es conveniente que los tamaños de los elementos sean similares al de los elementos del mismo. Se realizaron dos modelos, uno con un tamaño de malla en la zona del tanque de 2.5 mm x 2.5 mm x 2.5 mm (2880000 elementos) y otro de 1.25 mm x 1.25 mm x 1.25 mm (19077120 elementos) que fue el que finalmente se utilizó. En este modelo se mapearon los resultados de la etapa de propagación anterior.

En los bordes de todos los modelos de aire se utilizó la condición de borde tipo “flow-out”, que permite que las ondas de explosión se propaguen a través de los límites del modelo hacia el exterior sin reflejarse. Hay que tener en cuenta que esta condición se impone numéricamente de forma aproximada, por lo cual conviene alejar los bordes de la zona de interés. En todos los modelos se consideró el piso como una superficie rígida donde sí se refleja la onda. Para evaluar la presión e impulso en distintos sectores y comparar con los valores de referencia, se

dispusieron puntos de medición, *gauges*, indicados como puntos en la Figura 2c.

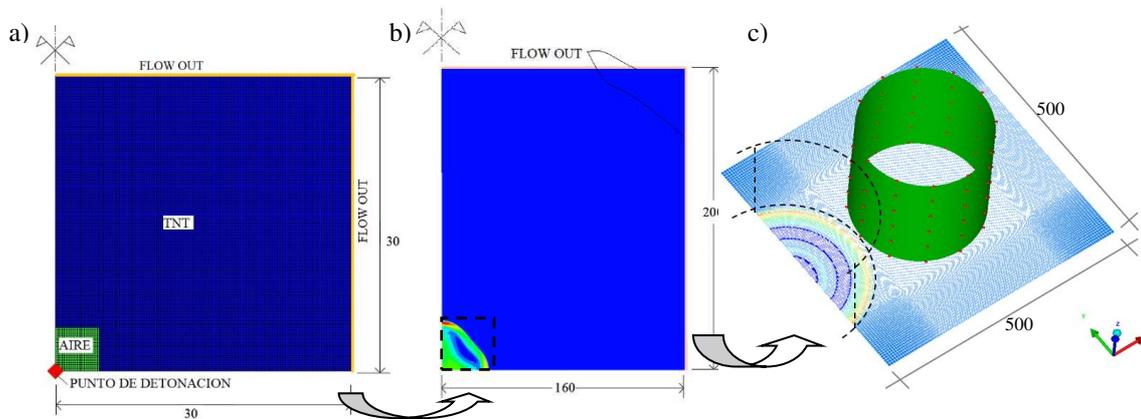


Figura 2: Etapas de modelación (dimensiones en mm). a) Etapa 1: generación, b) Etapa 2: propagación y c) Etapa 3: interacción

Los programas multifísica con integración explícita en el tiempo generalmente desacoplan la parte volumétrica de la respuesta del material de la desviadora. En el caso de fluidos compresibles que no tienen resistencia al corte sólo es necesario definir la ecuación de estado (EOS) del material que relaciona la presión con la densidad y la energía específica. Para modelar el explosivo, se utilizó el material TNT incluido en la librería de AUTODYN, con EOS de Jones-Wilkins-Lee (JWL), cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2.

ρ [g/cm ³]	A [kPa]	B [kPa]	R_1	R_2	W	V_{C-J} [m/s]	e_{cj} [kJ/m ³]	P_{CJ} [kPa]
1.63	3.7377e+8	3.7471e+6	4.15	0.90	0.35	6.93e+3	6.0e+6	2.1e+7

Tabla 2: Propiedades del TNT.

Donde, ρ es la densidad; A , B , R_1 , R_2 y w , son parámetros de ajuste de JWL; V_{C-J} , es la velocidad de detonación C-J; e es la energía interna específica; P_{C-J} , es la presión C-J.

El aire se modeló con la EOS de un gas ideal cuyas propiedades están indicadas en la Tabla 3.

ρ [g/cm ³]	γ	T [K]	C_v [J/kgK]	e [mJ/mg ³]
1.225e-3	1.40	288.2	0.90	2.068e+5

Tabla 3: Propiedades del aire.

Donde γ es la constante adiabática, T es la temperatura, C_v es el calor específico, e es la energía interna.

3.2 Modelo del tanque

El tanque se modeló como una cáscara cilíndrica sin tapa superior. Se usaron elementos de cáscara (Shell) de 4 nodos con integración reducida y 3 puntos de integración en el espesor, con control de *hourglass*. Se definieron dos tamaños de malla: 3.9 mm en sentido circunferencial y 2.5 mm en altura (200 x 100 = 20000 elementos), y 1.96 mm en sentido circunferencial y 1.98 mm en altura (400 x 126 = 50400 elementos). En el trabajo se presentan los resultados de esta última malla. Para simular el refuerzo del anillo superior, se dio un mayor espesor de la cáscara en correspondencia con el mismo. No se consideró ningún tipo de imperfección en el análisis.

Como condiciones de borde sólo se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones en la circunferencia de la base. Se definieron puntos de control para valorar esfuerzos y desplazamientos a distintas alturas y para distintos ángulos θ de la normal a la pared del tanque respecto del de la dirección de propagación (Figura 3).

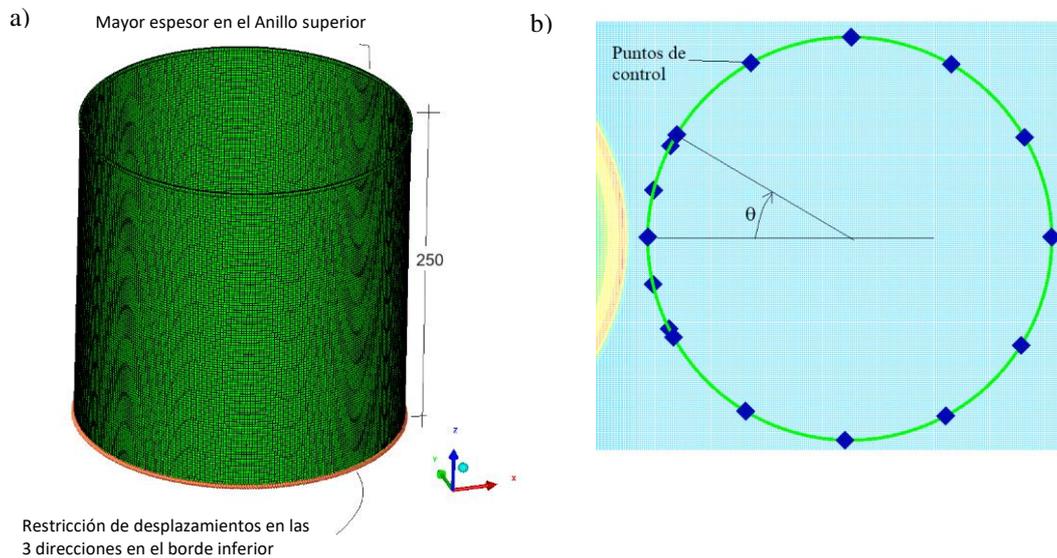


Figura 3: Modelo del tanque. a) Malla, b) Puntos de control

Para el acero del tanque se usó un modelo elastoplástico J2 asociado con endurecimiento lineal con las propiedades del material indicadas en Tabla 4, donde ρ es la densidad, E es el módulo de elasticidad, ν es el coeficiente de Poisson, σ_y es la tensión de fluencia, σ_u y ϵ_u son la tensión y la deformación específica de rotura respectivamente y E_T es el módulo tangente (luego de fluencia). No se tuvo en cuenta el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades del acero.

ρ [g/cm ³]	E [kPa]	ν	σ_y [kPa]	σ_u [kPa]	ϵ_u [%]	E_T [kPa]
7.93	2.0e+8	0.3	2.35e+5	6.35e+5	40	1.0e+6

Tabla 4: Propiedades del Acero AISI 304.

3.3 Interacción

Se estableció interacción fluido estructura. Se consideró una presión ambiente de 101.3 kPa. En la tercera etapa, una vez que pasó la onda de presión, interactuó con el tanque y salió de los bordes del modelo, se desactivó la malla de aire para acelerar el proceso de cálculo.

3.4 Simulación

Tratándose de una simulación explícita, el paso de tiempo del cálculo depende del tamaño del menor elemento de la malla y del material. Los modelos fueron corridos en un equipo de cálculo con procesador AMD RYZEN 9 5950X y 16 Gb de memoria RAM. En la Tabla 5 se muestran los pasos de tiempo, el tiempo total analizado y el tiempo real de corrida para cada etapa de la simulación.

	Etapa 1 (2D)	Etapa 2 (2D)	Etapa 3 (3D)]
Δt_{modelo} [ms]	1.7e-5	5.7e-5	2.2e-4
$t_{\text{analizado}}$ [ms]	6.28e-3	1.21e-1	8
t_{corrida}	1 m	5 m	45 h

Tabla 5: Paso del tiempo, tiempo de análisis y tiempo de corrida para cada etapa.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de presiones e impulsos

Como resultado del análisis, se obtuvieron los valores de presión e impulso en los puntos de la malla de aire cercanos al tanque indicados en la [Figura 2c](#). Estos valores representan presiones e impulsos reflejados resultantes de la interacción de la onda de presión con el tanque. En las [Figuras 4a y 4b](#) se representa, respectivamente, la variación en altura de las presiones e impulsos reflejados máximos para distintos ángulos de incidencia θ (Ver [Figura 4c](#)). Adicionalmente, en la [Figura 4c](#) se presenta la distribución de presiones máximas reflejadas alrededor de una circunferencia ubicada a 2 mm de la base del tanque. En las [Figuras 4a y 4b](#) se incluyen los valores experimentales de presión e impulso reflejados máximos ([Duong et al., 2012b](#)) que son idénticos a los utilizados por [Godoy y Ameijeiras \(2023\)](#) como valores uniformes en altura (Ver [Figura 1b](#)). A su vez, en la [Figura 4c](#) se incluye la distribución circunferencial de presiones utilizada por [Godoy y Ameijeiras \(2023\)](#) (Ver [Figura 1a](#)). La comparación muestra que la mayor diferencia entre la distribución de las presiones obtenidas en este trabajo y la utilizada en el análisis desacoplado [Godoy y Ameijeiras \(2023\)](#) se encuentra en la variación en altura (Ver [Figura 4a](#)).

Complementariamente, a los efectos de evaluar la influencia de la flexibilidad del tanque en el análisis acoplado, se simuló el mismo problema, pero con el tanque rígido, restringiendo los desplazamientos de todos los puntos del mismo. Los resultados se incluyen en las [Figuras 4a y 4b](#) y muestran la reducida influencia de la flexibilidad del tanque en la distribución de presiones e impulsos reflejados.

4.2 Análisis del tanque

En la [Figura 5](#) se presenta la configuración deformada del tanque luego de los ensayos ([Duong et al. 2012b](#)) junto al modelo numérico deformado en el que se marcan las zonas plastificadas para un tiempo de 8ms. Se observa que en el modelo el tanque plastifica, lo cual se corresponde con la configuración deformada permanente de los ensayos, y pandea, lo cual se manifiesta en la formación de un patrón de arrugas circunferenciales. La configuración deformada de una faja circunferencial ubicada a 18 mm del suelo, correspondiente a un tiempo $t = 8$ ms (ver [Figura 5b](#)), permite visualizar el patrón de arrugas del tanque y estimar, a partir de allí, una longitud de onda de alrededor de 9 mm en sentido circunferencial, valor aproximado a los ensayos experimentales que muestran una longitud de 10 mm ([Duong et al. 2012b](#)).

En la [Figura 5b](#) se evidencia la deformación en forma de pata de elefante en la base, también obtenida por [Godoy y Ameijeiras \(2023\)](#), pero aparece un modo de pandeo en la dirección axial en la parte superior del tanque que no se presenta en los ensayos ni en los resultados del modelo desacoplado, que puede deberse a pequeños errores de cálculo que funcionan como imperfecciones. Es probable también que la diferencia con los resultados experimentales se deba, entre otras causas, a la diferencia entre el explosivo utilizado en los ensayos, que no está especificado en los trabajos, y el TNT utilizado en el modelo para obtener valores similares de presiones e impulsos que obligó a considerar al explosivo ubicado a una distancia del tanque distinta a la del ensayo. Por otro lado, es clara la diferencia de las presiones actuantes en el

tanque en los modelos acoplados y desacoplados (Ver Figura 4).

En la Figura 6 se muestra la variación en el tiempo de los desplazamientos radiales para distintas alturas en correspondencia con un ángulo de incidencia $\theta = 0^\circ$ y los valores remanentes obtenidos en los ensayos y con el modelo desacoplado. Se puede apreciar la vibración de la pared del tanque y la tendencia a la estabilización para el punto de mayor desplazamiento de 2 mm, valor coincidente con el estudio de Godoy y Ameijeiras (2023) y algo superior al obtenido experimentalmente por Duong et al. (2012b). El punto ubicado en la parte superior del tanque tiene desplazamientos menores, pero continúa vibrando a los 8ms.

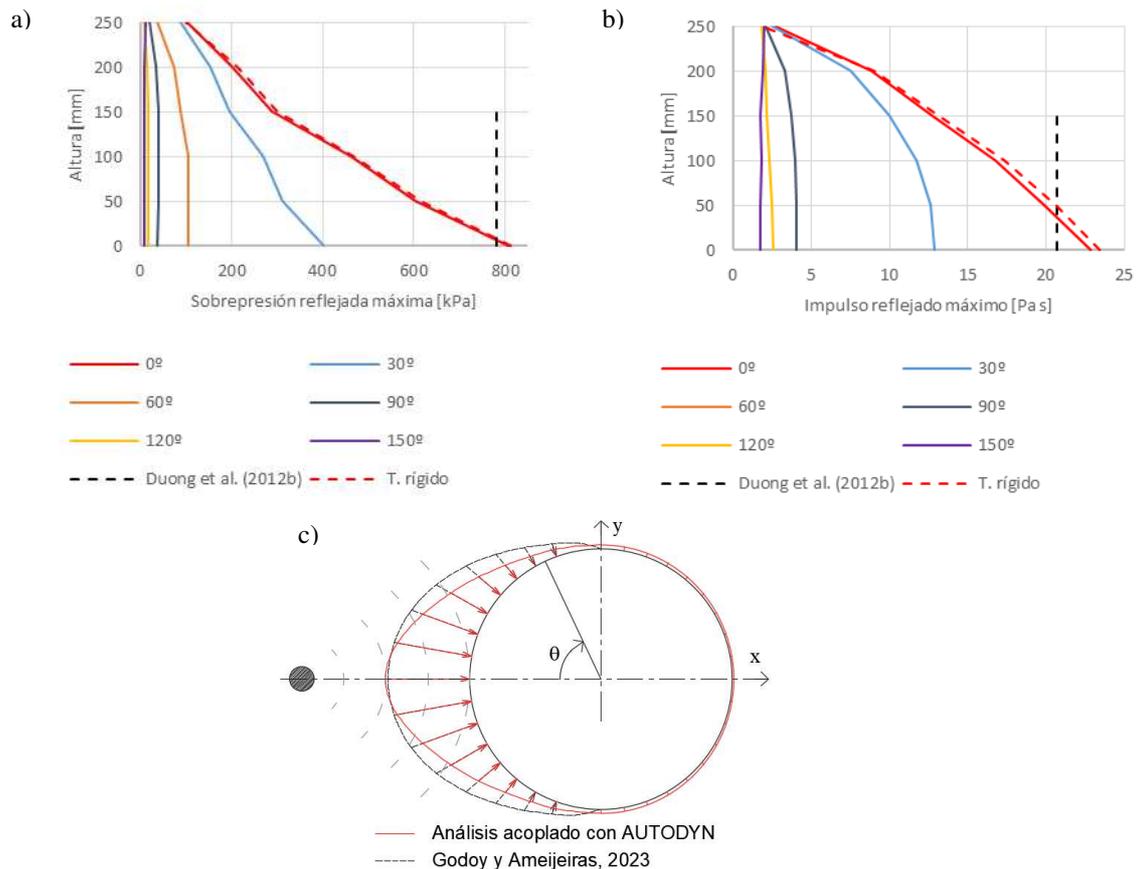


Figura 4: Distribución de presiones e impulsos reflejados máximos. a) Variación de presiones en altura; b) Variación de impulsos en altura; c) Variación de presiones alrededor de la circunferencia ($z=2\text{mm}$)

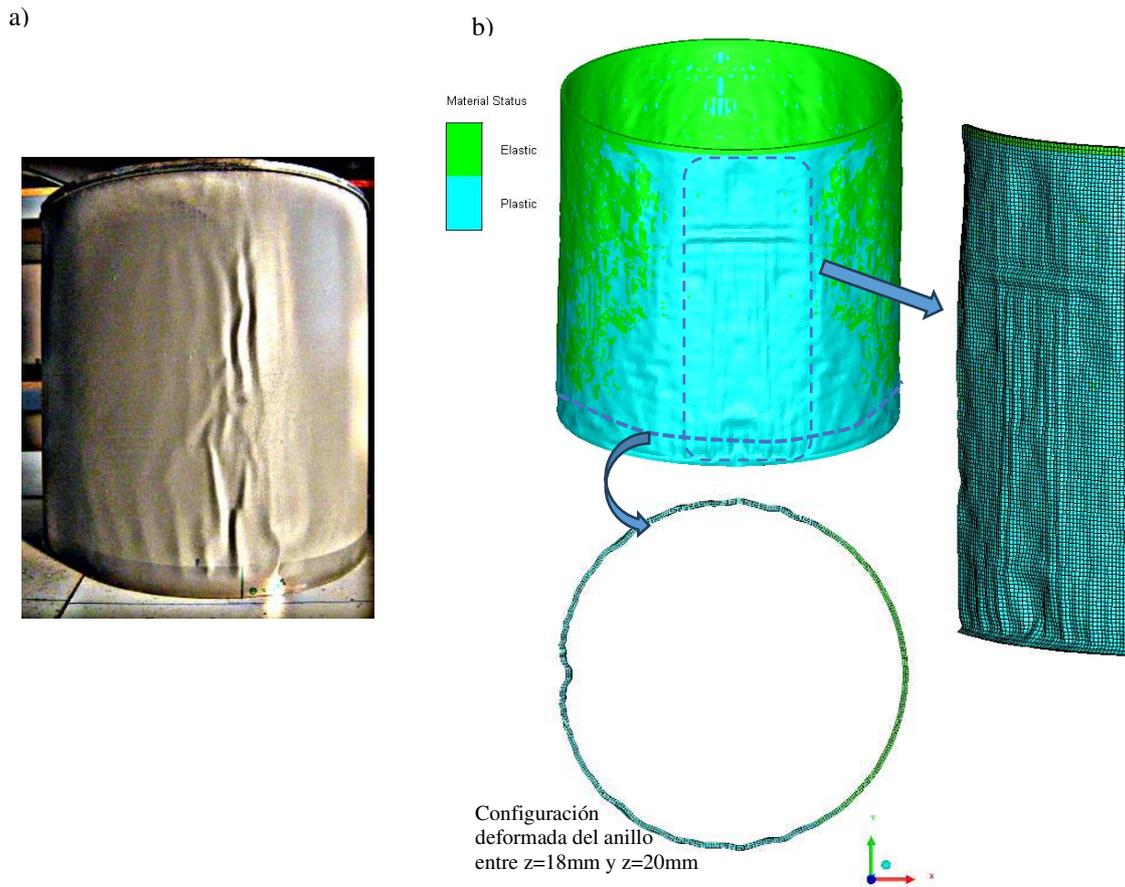


Figura 5: Resultados de la explosión en el tanque. a) Configuración deformada de tanque experimental (Duong et al. 2012b), b) Material status amplificado x5 para modelo numérico acoplado ($t=8\text{ms}$).

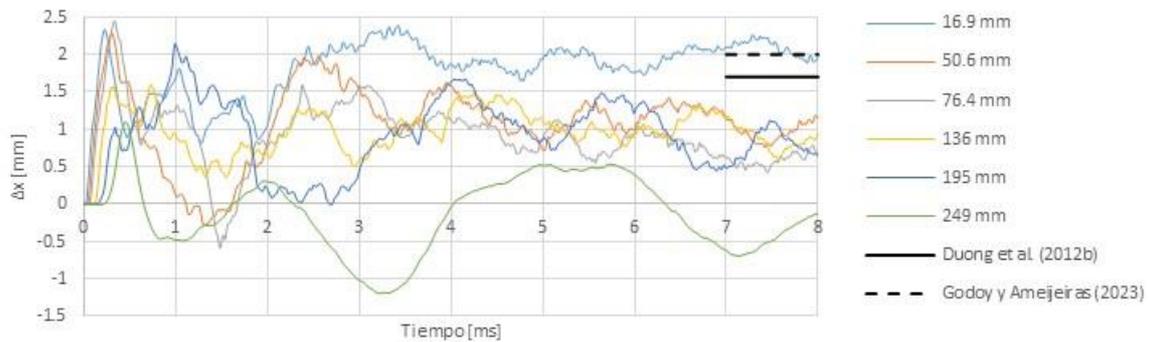


Figura 6: Desplazamientos radiales en función del tiempo para distintas alturas y ángulo $\theta=0^\circ$

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realiza la simulación numérica de un tanque vertical de almacenamiento de combustible, abierto y apoyado, sometido a explosiones externas. Se usa un programa multifísica explícito a fin de modelar de manera acoplada la fuente de la explosión y la estructura.

El estudio parte de la simulación de la detonación de una carga de TNT equivalente, considera la propagación de la onda de presión en aire y la incidencia e interacción con las

paredes del tanque. Se debe observar que la distribución de presiones producida por la masa de TNT equivalente puede no corresponder a la real de los ensayos que usan otro tipo de explosivo.

Los resultados permiten obtener la distribución espacial de presiones en altura y alrededor del tanque y verificar que el efecto de la flexibilidad de la estructura en el mapa de presiones es despreciable en este caso.

El análisis realizado conduce a valores de desplazamientos máximos del tanque similares a los obtenidos experimentalmente (Duong et. Al, 2012b) y a los calculados con modelo desacoplado con simplificación de la distribución de presiones en las paredes del tanque (Godoy y Ameijeiras, 2023).

Si bien, la simulación acoplada permite representar más fielmente el problema al obtener numéricamente la variación de la presión en altura y en la dirección circunferencial, sin necesidad de aproximar la misma, requiere gran capacidad de cálculo y tiempo computacional y los desplazamientos del tanque obtenidos son similares a los de los modelos desacoplados. Por esta razón, no es un procedimiento aconsejable para el diseño de tanques sino más bien para el diseño de detalles específicos o el análisis de fallas locales.

AGRADECIMIENTOS

Los dos primeros autores agradecen el apoyo a la Universidad Nacional de Tucumán, al CONICET y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. El tercer autor agradece el apoyo a la Universidad Nacional de Córdoba y a la SeCyT-UNC.

REFERENCIAS

- Duong, D. H., Hanus, J. L., Bouazaoui, L., Penetier, O., Moriceau, J., Prod'homme, G., Reimeringer, M., Response of a tank under blast loading – Part I: Experimental characterization, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16(9): 1023-1041, 2012a.
- Duong, D. H., Hanus, J. L., Bouazaoui, L., Regal, X., Prod'homme, G., Noret, E., Yalamas, T., Reimeringer, M., Bailly, P., Penetier, O., Response of a tank under blast loading – Part II: Experimental structural response and simplified analytical approach, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16 [9]: 1042-1057, 2012b.
- Godoy, L.A., Ameijeiras, M.P., Plastic buckling of oil storage tanks under blast loads, *Structures*, 53: 361-372, 2023.
- Lai, E., Zhao, J., Li, X., Hu, K., Chen, G. Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact. *J. Loss Preven Process Indust* 73 104617, 2021.
- Lu, S., Wang, W., Chen, W., Ma, J., Shi, Y., Xu, Ch. Behaviors of thin-walled cylindrical shell storage tank under blast impacts, *Shock and Vibration*, 2019 6515462, 2019.
- Luccioni, B., Ambrosini D., Danesi R. Blast load assessment using Hydrocodes, *Engineering Structures* 28(12):1736-1744, 2006.
- Mittal V., Chakraborty Y., Matsagar V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures* 84: 91–111, 2014.
- Myers P., *Aboveground Storage Tanks*, McGraw Hill, 1997.
- Smith P. y Hetherington J. *Blast and ballistic loading of structures*. Great Britain: Butterworth Heinemann Ltd, 1994.
- Wang, Z., Hu, K., Zhao, Y. Doom-roof steel tanks under external explosion: Dynamic response and anti-explosion measures, *Journal of Constructional Steel Research* 190, 107118, 2022.