

## SIMULACIÓN ACOPLADA DE EXPLOSIONES EXTERNAS SOBRES TANQUES DE ALMACENAMIENTO METÁLICOS

### COUPLED SIMULATION OF EXTERNAL EXPLOSIONS ON METAL STORAGE TANKS

Fátima Rodríguez Salinas<sup>a</sup>, Bibiana Luccioni<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina, [madiazfontdevila@herrera.unt.edu.ar](mailto:madiazfontdevila@herrera.unt.edu.ar), [fisla@herrera.unt.edu.ar](mailto:fisla@herrera.unt.edu.ar), [bluccioni@herrera.unt.edu.ar](mailto:bluccioni@herrera.unt.edu.ar), <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

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

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

**Palabras clave:** Tanques de almacenamiento, acero, explosiones externas, simulación acoplada

**Resumen.** Normalmente se utilizan tanques metálicos cilíndricos para almacenamiento de distintos productos petroquímicos. La respuesta y el proceso de falla de los tanques de acero bajo ondas de choque producidas por explosiones externas constituyen problemas dinámicos complejos, muy rápidos, con un grado de acoplamiento importante y alta no linealidad. En este trabajo se estudia mediante un código multifísica explícito el comportamiento de un tanque cilíndrico a escala reducida bajo explosiones externas. Se analizan los efectos de la posición de la carga explosiva, la geometría y propiedades del material en la respuesta del mismo. Adicionalmente se tiene en cuenta el efecto del líquido en el interior de tanque y la presencia de otros tanques u obstáculos en el camino de la onda. Se estudia la deformación y posible daño del tanque. Los resultados muestran la importancia de analizar el problema acoplado y resultan de interés para el diseño y verificación de seguridad de este tipo de tanques frente a explosiones externas.

**Keywords:** Storage tanks, steel, external explosions, coupled simulation.

**Abstract.** Cylindrical metal tanks are commonly used for storage of various petrochemical products. The response and failure process of steel tanks under shock waves produced by external explosions constitute complex, very fast dynamic problems, with a significant degree of coupling and high nonlinearity. The behavior of a reduced-scale cylindrical tank under external explosions is studied with an explicit multi-physics code in this paper. The effects the explosive charge position, the geometry and the material properties on the tank response are analyzed. Additionally, the effect of the liquid inside the tank and the presence of other tanks or obstacles in the path of the wave are taken into account. The deformation patterns and the possible damage of the tank are studied. The results show the importance of analyzing the coupled problem and are of interest for the design and safety verification of this type of tanks against external explosions.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los graves daños y los efectos negativos de gran alcance provocados por algunos eventos explosivos ocurridos en plantas de almacenamiento muestran la necesidad del análisis bajo carga explosiva como parte del diseño de los tanques, especialmente cuando forman parte de infraestructura crítica o cuando contienen fluidos inflamables. Durante mucho tiempo los tanques se han diseñado en base a reglas simplificadas y métodos empíricos. El análisis de las estructuras de tanques bajo cargas explosivas mediante técnicas numéricas se empezó a desarrollar en las últimas décadas y sigue siendo un tema de mucho interés en la actualidad (Rosin et al. 2024).

Se pueden usar diferentes enfoques para analizar la respuesta estructural bajo cargas explosivas. Los códigos explícitos multi-física, permiten realizar análisis complejos de dinámica de fluidos computacional (CFD) en los que la onda expansiva y la estructura interactúan. Son adecuados para simular directamente la explosión, desde la generación de la misma y la propagación de la onda expansiva, para luego interactuar con la estructura y obtener la respuesta estructural en un modelo computacional global. Como contrapartida, estos procedimientos requieren mucho tiempo y recursos computacionales.

Por otro lado, existen procedimientos simplificados que varían desde el análisis dinámico desacoplado de la propagación de la presión y la respuesta estructural en dos modelos de cálculo diferentes, hasta métodos dinámicos simplificados que solo calculan la respuesta estructural utilizando una carga de presión de explosión determinada semi-analíticamente. La presión debida a la explosión pre-calculada se aplica al modelo de simulación como una historia de carga en el tiempo sin considerar el efecto de la deformación estructural en la propagación y distribución de la presión. Luego, se determina la respuesta estructural. Como se trata de cargas de corta duración, generalmente de unos pocos milisegundos, ese análisis también se puede hacer mediante códigos dinámicos explícitos. Sin embargo, también se utilizan métodos estáticos, en los que las características dinámicas de la carga y la respuesta estructural se tienen en cuenta de una manera muy simplificada utilizando los denominados factores de incremento dinámico.

Muchos trabajos realizan un análisis dinámico desacoplado simplificado (Rosin et al. 2024). En un trabajo anterior (Rodríguez Salinas et al. 2023), se realizó un análisis acoplado del efecto de explosiones en un tanque a escala reducida que fue ensayado experimentalmente por otros autores (Duong et al. 2012a; Duong et al. 2012b) con el objetivo de evaluar el efecto del acoplamiento sobre la respuesta del tanque frente a explosiones. Se concluyó que la flexibilidad de la estructura prácticamente no influye en los valores de presión resultante sobre el tanque y se obtuvieron resultados globales similares a los del análisis desacoplado con simplificaciones en la distribución de la carga. Sin embargo, es claro que hay muchas situaciones que no pueden ser tenidas en cuenta mediante un análisis desacoplado con carga simplificada y que podrían resultar de interés en el diseño de tanques. Por esta razón, en la última década se han publicado varios trabajos que realizan un análisis acoplado (Mittal et al. 2014; Lu et al. 2019; Lai et al. 2021; Li et al. 2022; Wang et al. 2022).

En este trabajo se realiza un análisis acoplado del mismo tanque a escala reducida (Duong et al. 2012a; Duong et al. 2012b) justamente con el objeto de estudiar efectos que no pueden ser analizados con un análisis simplificado, como la influencia de la ubicación de la carga explosiva y la presencia de otros tanques en el camino de la onda de presión, en la distribución de presiones en el tanque y la consiguiente respuesta del mismo. Se estudia también el efecto del líquido contenido del tanque. Adicionalmente, se estudia la influencia de la dependencia de la velocidad de deformación del material del tanque, del anillo rigidizador superior y de la rigidez de la unión de la pared con la base en la respuesta del tanque.

## 2 TANQUE ANALIZADO

Se analiza un tanque cilíndrico de de acero inoxidable AISI 304 a escala reducida de diámetro  $D = 250$  mm, altura  $H = 250$  mm y espesor  $t = 0.1$  mm (Duong et al. 2012a). Los valores de presión e impulso máximos registrados se presentan en Tabla 1, donde  $P_i$  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.

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

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

## 3 MODELO NUMÉRICO

Para el desarrollo de los modelos acoplados se utilizó el programa multi-física explícito AUTODYN incluido dentro de ANSYS Mechanical 2023 R2.

Los modelos incluyen el aire en donde se detona la carga explosiva, la propagación de la onda en el entorno y su interacción con el tanque. A su vez, en algunos casos se modeló el fluido contenido en el tanque para evaluar su efecto en la respuesta.

### 3.1 Explosión y propagación de onda de presión

Mediante simulación numérica, en Rodríguez Salinas et al. (2023) se obtuvo la masa de TNT,  $W = 450$  mg, apoyada sobre el suelo y a una distancia  $d = 160$  mm, equivalente a la burbuja explosiva usada en los ensayos experimentales (Duong et al. 2012b), que producía valores de presión e impulso reflejados en la base del tanque próximos a los presentados en la Tabla 1.

La mayoría de los análisis de este trabajo se realizan para esta carga explosiva. Adicionalmente, en la sección 4 se estudia el efecto de la variación de la masa y posición del explosivo.

Por una cuestión de eficiencia computacional, como los primeros instantes de generación y propagación de la onda explosiva requieren mucha precisión y aún no involucran a la estructura, el análisis se realizó en etapas como en Rodríguez Salinas et al. (2023). En la primera etapa (generación), aprovechando la simetría del modelo, se simuló la detonación de la masa explosiva y su propagación en un pequeño cilindro de aire alrededor de la misma. Se utilizó para ello un procesador Euler-Godunov. Los resultados de este modelo se mapearon en el modelo axial simétrico correspondiente a la segunda etapa (propagación) que representa un cilindro de aire en donde se propaga la onda de presión. Se corrió el segundo modelo hasta que la onda de presión llegaba a una distancia levemente inferior a la distancia al tanque.

En la tercera etapa (interacción), 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. Se utilizaron los dos refinamientos de malla previamente estudiados (Rodríguez Salinas et al., 2023). Para los estudios de presiones se utilizó un tamaño de malla de 1.25 mm de lado en la zona del tanque. En los casos en los que se estudiaba la respuesta estructural, se utilizaron elementos de 2.5 mm de lado en la zona del tanque. En estos modelos 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.

Para el aire y el TNT se utilizaron los modelos materiales de la librería de AUTODYN que corresponden a Jones-Wilkins-Lee (JWL) y gas ideal, respectivamente, y propiedades estándar para esos materiales.

### 3.2 Tanque

El tanque se modeló como una cáscara cilíndrica sin tapa superior que se colocó en el modelo de la tercera etapa antes descrita y se estableció interacción fluido estructura.

Se utilizaron 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: 1.98 mm en sentido circunferencial y 1.98 mm en altura y 3.9 mm en sentido circunferencial y 3.9 mm en altura, en correspondencia con los dos refinamientos de malla utilizados para el aire. Se dio mayor espesor a la fila superior de elementos para simular el anillo rigidizador.

Como condiciones de borde sólo se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones en la circunferencia de la base. En el punto 7 se estudia el efecto de restringir los giros.

Para el acero del tanque se usó un modelo elastoplástico J2 asociado, con endurecimiento lineal, con las propiedades mecánicas indicadas en la [Tabla 2](#), donde  $\rho$  es la densidad,  $E$  es el módulo de elasticidad,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson,  $\sigma_{y0}$  es la tensión inicial de fluencia,  $\sigma_u$  y  $\varepsilon_u$  son la tensión y la deformación específica de rotura respectivamente y  $E_T$  es el módulo tangente (luego de fluencia). En los modelos no se tuvo en cuenta el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades del acero, salvo en la sección 7, donde se analiza la influencia de este efecto en la respuesta del tanque.

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E$ [kPa]	$\nu$	$\sigma_{y0}$ [kPa]	$\sigma_u$ [kPa]	$\varepsilon_u$ [%]	$E_T$ [kPa]
7.93	2.0e+8	0.3	2.35e+5	6.35e+5	40	1.0e+6

Tabla 2: Propiedades del Acero AISI 304.

## 4 EFECTO DE LA CANTIDAD Y UBICACIÓN DE LA CARGA EXPLOSIVA

La masa de explosivo indicada en Sección 3.1 (0.45g de TNT), ubicada sobre el suelo a 160 mm del tanque, produce una distribución no uniforme de presión e impulso en altura sobre la pared del tanque como se ilustra en la [Figura 1](#). La misma se corresponde con los valores medidos por [Duong et al. \(2012b\)](#) en la base del tanque. En general, los enfoques simplificados en los que se define la presión mediante fórmulas empíricas no consideran la variación de la presión e impulso en altura ([Figura 1](#)) y toman una distribución circunferencial similar a la obtenida con el enfoque acoplado ([Godoy y Amejeiras 2023](#); [Rodríguez Salinas et al., 2023](#)).

Con la idea de analizar situaciones que conduzcan a una distribución más uniforme en altura, se consideró una carga explosiva de 569m g de TNT ubicada a una distancia  $d=110$  mm del tanque y a una altura  $h$  sobre el nivel de suelo equivalente a la mitad de altura del tanque (125mm). No se consideró la reflexión de la onda de presión en el suelo durante la generación y propagación de la onda. En la [Figura 1](#) se incluyen las distribuciones de presión e impulso correspondientes a esa carga y ubicación del explosivo. Se puede observar que la misma conduce a valores similares a los medidos por [Duong et al. \(2012b\)](#), en este caso, a media altura del tanque, pero conduce a valores mucho mayores en la base del tanque. La tendencia es similar en las presiones e impulsos incidentes que en los reflejados.

Adicionalmente, en la [Figura 2](#) se analiza el efecto de variar la cantidad de explosivo, altura y distancia al tanque, así como las propiedades de la superficie del suelo en la distribución de presiones incidentes en altura. Como era de esperar, se observa que los valores picos de presión

crecen con la masa de explosivo y al reducir la distancia al tanque. La máxima sobrepresión incidente se produce aproximadamente a la misma altura del explosivo y, a medida que aumenta esta altura, la distribución de presiones resulta más uniforme. Las propiedades del piso durante la propagación de la onda sólo afectan la distribución de presiones en la parte inferior del tanque, obteniéndose presiones mayores cuando la onda se refleja en el piso, debido al efecto Match (Smith y Hetherington, 1994).

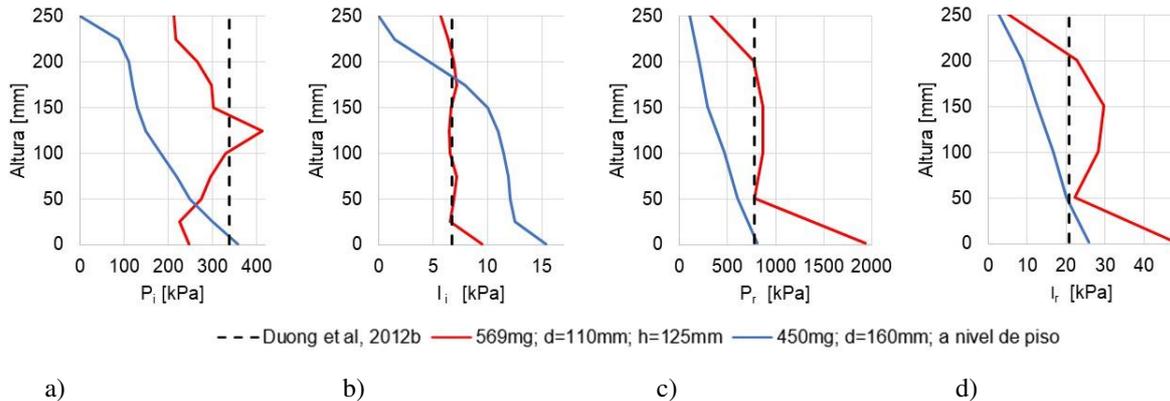


Figura 1: Distribución de sobrepresión e impulso máximos en altura. a) Sobrepresión incidente; b) Impulso incidente; c) Sobrepresión reflejada; d) Impulso reflejado.

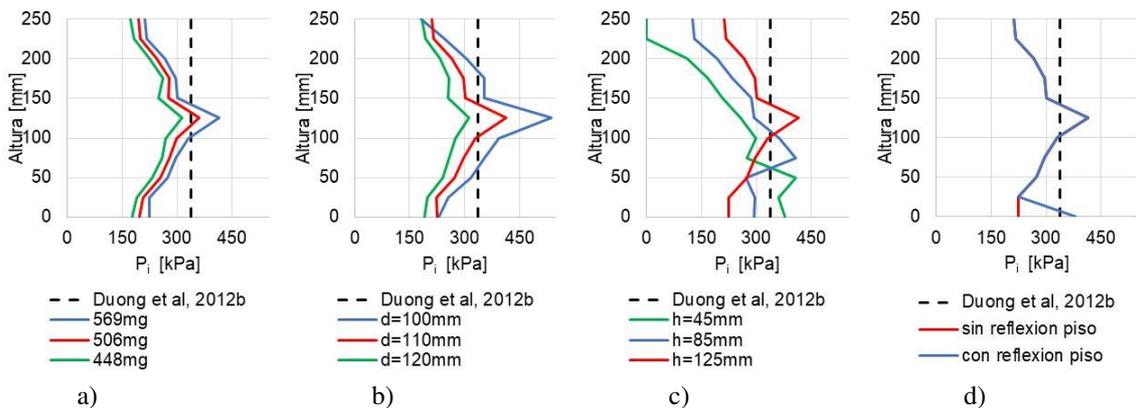


Figura 2: Distribución de sobrepresión incidente máxima. a) Efecto de la masa de explosivo (d=110mm, h=125mm); b) Efecto de la distancia al tanque (M=569mg, h=125 mm); c) Efecto de la altura sobre el suelo (M=569mg, d=110mm); d) Efecto de las propiedades de la superficie del suelo (M=569mg, d=110mm, h=125 mm).

Con el fin de comparar el efecto sobre la respuesta del tanque se resolvió el problema acoplado correspondiente a 0.569g de TNT a 110 mm del tanque y 125 mm de altura. En la Figura 3 se comparan los tanques deformados al final del análisis (8ms) y la historia de desplazamientos radiales de los puntos del tanque situados sobre la vertical más cercana al explosivo. Es claro que la carga de 0.569g de TNT produce desplazamientos y deformaciones mayores a la carga de 0.45g porque, además de ser mayor, se encuentra más cerca del tanque. Sin embargo, los desplazamientos máximos remanentes son del mismo orden (2 mm) y algo superior al medidos por Duong et al. (2012b) (1.8 mm). Adicionalmente, como la carga explosiva se encuentra a una cierta altura, la onda alcanza primero los puntos ubicados a esa altura y luego se intensifica la presión en la base por los reflejos del suelo. Esto da lugar a un patrón de pandeo marcadamente distinto, sin los pliegues horizontales obtenidos para la carga sobre el suelo.

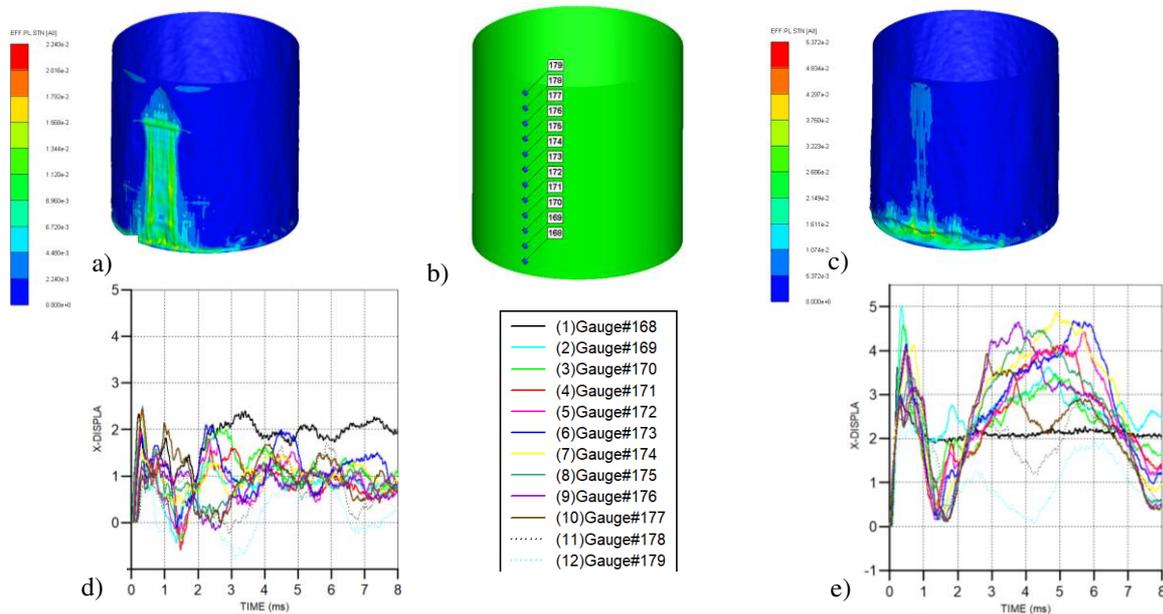


Figura 3: Efecto de cantidad y posición del explosivo en la respuesta de tanque. a) Deformada para 0.45g TNT(x5); b) Deformada para 0.569 g TNT (x5); c) Puntos de medición; d) Desplazamientos en dirección radial para 0.45g TNT; e) Desplazamientos en dirección radial para 0.569g TNT.

## 5 BATERÍAS DE TANQUES

Una de las grandes ventajas de la simulación acoplada es que permite modelar el camino de la onda de presión con todos los obstáculos, lo cual puede ser importante cuando los tanques no se encuentran aislados, sino formando baterías de tanques. A los efectos de evaluar cómo influye la presencia de otros tanques en la onda de presión y en el comportamiento del tanque, se simuló numéricamente dos problemas, con dos disposiciones distintas de los tanques y las posiciones del explosivo que se indican en la [Figura 4](#). El explosivo consistía en 0.45g de TNT sobre el suelo a 160 mm de los tanques más cercanos. Se resolvieron ambos problemas con los cuatro y tres tanques; luego se eliminaron los o el tanque de la fila delantera y se volvieron a resolver. En todos los casos, los tanques de la segunda fila plastificaron. En la [Figuras 5a](#) y [5b](#) se comparan los desplazamientos en la dirección x de los puntos indicados en la [Figura 4](#) para ambas disposiciones con y sin los tanques delanteros. Se observa que, cuando no están los tanques delanteros, en ambas disposiciones, los desplazamientos resultan algo mayores al comienzo. Pero luego, dependiendo de la disposición, las presiones son mayores cuando están los tanques delanteros. Todo depende del efecto pantalla de los tanques delanteros y de las reflexiones de la onda en los tanques vecinos. Como conclusión, puede resultar poco conservador calcular las presiones en los tanques sin tener en cuenta los obstáculos en el recorrido de la onda.

## 6 CONTENIDO DEL TANQUE

En general, la mayoría de los autores simulan los tanques vacíos porque resulta conservador para el tanque mismo.

En esta sección se analiza la respuesta de un tanque similar al de las secciones anteriores pero sin anillo rigidizador, lleno hasta una altura de 230 mm con un fluido de densidad  $\rho = 0.998 \text{ g/cm}^3$  y sometido a una explosión de 0.45g de TNT sobre el suelo a 160 mm del tanque.

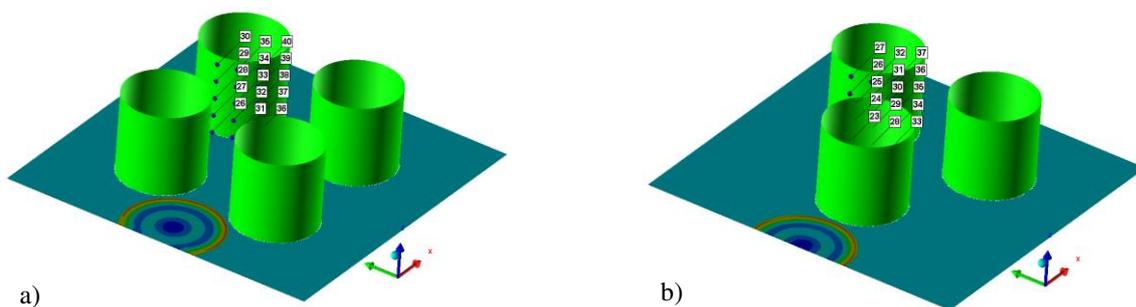


Figura 4: Baterías de tanques: a) Disposición 1; b) Disposición 2.

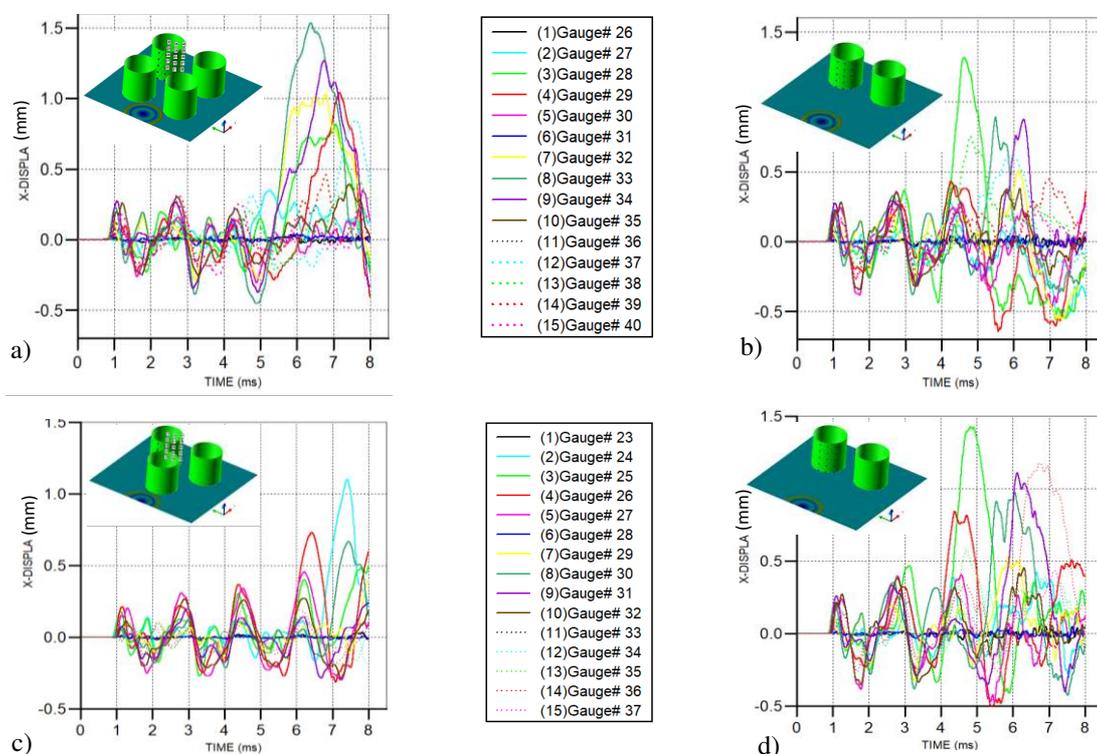


Figura 5: Desplazamientos en la dirección X. a) Disposición 1 con los cuatro tanques, b) Disposición 1 sin los tanques delanteros; c) Disposición 2 con los tres tanques; d) Disposición 2 sin el tanque delantero

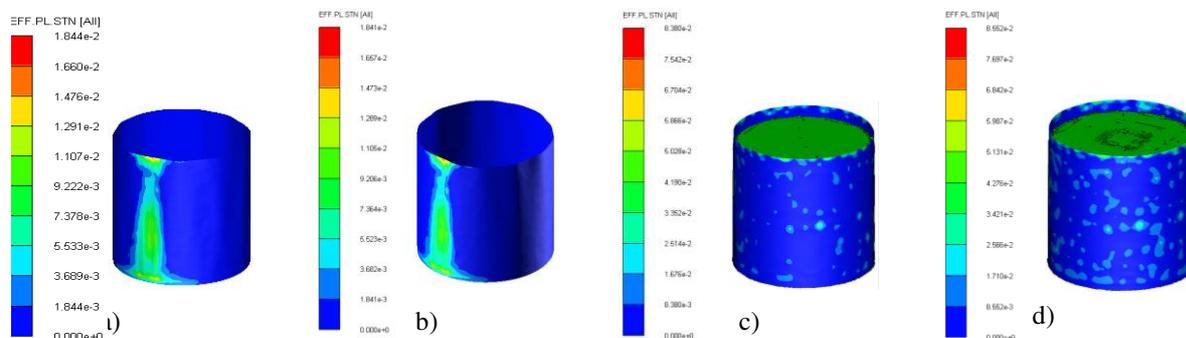


Figura 6: Deformaciones plásticas. a) Tanque vacío; b) Tanque con presión hidrostática; c) Tanque con fluido antes de la explosión; d) Tanque con fluido luego de la explosión.

A tal fin, se emplearon dos enfoques, uno muy simplificado que consiste en poner la presión del fluido como presión hidrostática y un segundo enfoque, más realista, que consiste en modelar el fluido dentro del tanque. Para modelar el fluido es necesario utilizar un procesador Euler Godunov en la tercera etapa. El mismo se utiliza también en el caso de presión hidrostática e incluso en la simulación del tanque vacío para que los resultados sean comparables. En ambos enfoques es necesario resolver primero el problema cuasi-estático de la presión del fluido. Como se utiliza un programa dinámico explícito, se debe dejar que se establezca la solución antes de someterlo a las explosiones. Se observa que cuando se modela el líquido, como el mismo se introduce inicialmente de manera instantánea, se produce un oleaje que golpea las paredes del tanque dando lugar a tensiones mayores a las generadas por la presión hidrostática. El tanque entra en fluencia (Ver [Figura 6c](#)) porque no estaba diseñado para resistir ese oleaje.

En la [Figura 6](#) se muestran las deformaciones plásticas luego de la explosión para el tanque vacío y lleno según ambos enfoques. Se puede ver que la inclusión de la presión hidrostática, prácticamente no afecta la plastificación del tanque. Cuando se modela el fluido, aun cuando el tanque estaba inicialmente plastificado, el aumento de las deformaciones plásticas debido a la onda de presión es un orden menor ( $10^{-3}$ ).

En la [Figura 7](#) se muestran los desplazamientos en la dirección x (radial) de los puntos sobre vertical más cercana a la explosión, correspondientes al tanque vacío y con líquido usando ambos enfoques. En los tanques con contenido, los primeros 8 ms corresponden a la acción del fluido y la explosión alcanza al tanque recién a los 8 ms. Los desplazamientos son mayores que en las secciones anteriores porque el tanque no tiene anillo rigidizador. Se observa que la presión hidrostática prácticamente no influye en los desplazamientos. Sin embargo, cuando se modela el fluido, aun cuando el tanque está plastificado al llegar la explosión, los desplazamientos producidos por la misma son mucho menores e incluso siguen siendo negativos (hacia afuera del tanque) en la mayoría de los puntos.

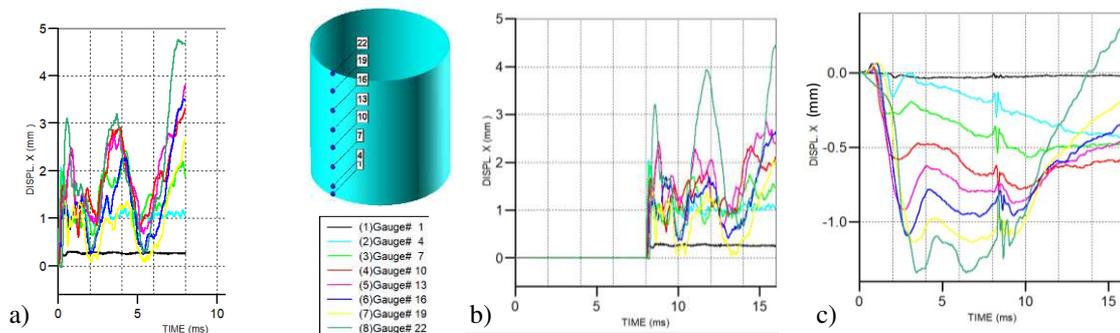


Figura 7: Desplazamientos en la dirección x (radial). a) Tanque vacío; b) Tanque con presión hidrostática; c) Tanque con fluido.

## 7 EFECTO DE LA GEOMETRÍA Y MATERIAL DEL TANQUE

En la [Figura 8a](#) se presenta, la variación de los desplazamientos de la pared del tanque en el caso con anillo rigidizador para evaluar su efecto. La comparación con la [Figura 7a](#) permite ver el importante efecto que tiene el anillo rigidizador, en este caso disminuyendo los desplazamientos resultantes.

En los ejemplos desarrollados no se modeló el fondo del tanque porque directamente se fijaron las paredes al suelo. Dependiendo de cómo esté materializada la unión de los laterales del tanque con el fondo del mismo, esa unión se parecerá más a una unión que restringe sólo desplazamientos (apoyo simple) o desplazamientos y giros (empotramiento). En la [Figura 8](#) se muestra el efecto de cambiar las condiciones de apoyo en los desplazamientos de la pared del

tanque con anillo rigidizador para la misma carga explosiva de 0.45g de TNT sobre el suelo a 160 mm del tanque. Es claro que, si bien al comienzo no hay prácticamente diferencia en los desplazamientos, los desplazamientos remanentes son mucho menores en el tanque empotrado en la base.

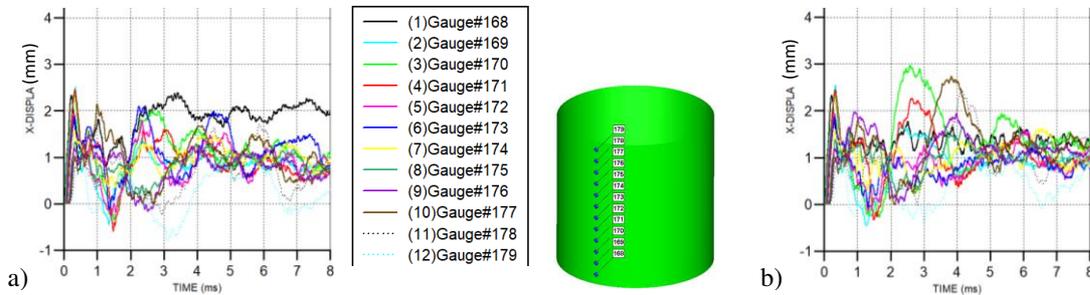


Figura 8: Desplazamientos en la dirección x (radial). a) Pared simplemente apoyada; b) Pared empotrada.

En todos los ejemplos anteriores se despreció el efecto de la velocidad de deformación en la respuesta del acero del tanque. Sin embargo, es sabido que la resistencia del acero aumenta con la velocidad de deformación que, en el caso de cargas explosivas, puede alcanzar valores elevados. A los efectos de cuantificar ese efecto en la respuesta del tanque, se modeló el mismo problema pero utilizando el modelo de Cowper and Symond donde la tensión de fluencia  $\sigma_y$  se calcula teniendo en cuenta el efecto de la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  como:

$$\sigma_y = (\sigma_{y0} + H\bar{\epsilon}^{p_n}) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right]; \quad H = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (1)$$

Donde  $\bar{\epsilon}^p$  es la deformación plástica efectiva,  $n$ ,  $C$ , y  $p$  son constantes del material. Se tomó  $n = 1$  (endurecimiento lineal),  $C = 40000$  1/s y  $p = 4.83$ , valores promedio para ese tipo de acero, obtenidos de una recopilación bibliográfica (Rotili et al. 2023). El factor entre corchetes en la Ec.(1) representa el factor de incremento dinámico.

En la Figura 9a se muestra la evolución de los desplazamientos del tanque con anillo teniendo en cuenta el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento del material. En la Figura 9b se presenta la variación de la velocidad de deformación. La comparación de los desplazamientos de la Figura 9a con los correspondientes al caso en que no se considera el efecto de la velocidad de deformación (Figura 8a), muestra que el tanque resulta más resistente y se deforma menos por efecto de la velocidad de deformación. Esta última valores de 120 1/s (Figura 9b), lo cual corresponde a una amplificación dinámica de 1.3 de acuerdo a la Ec.(1).

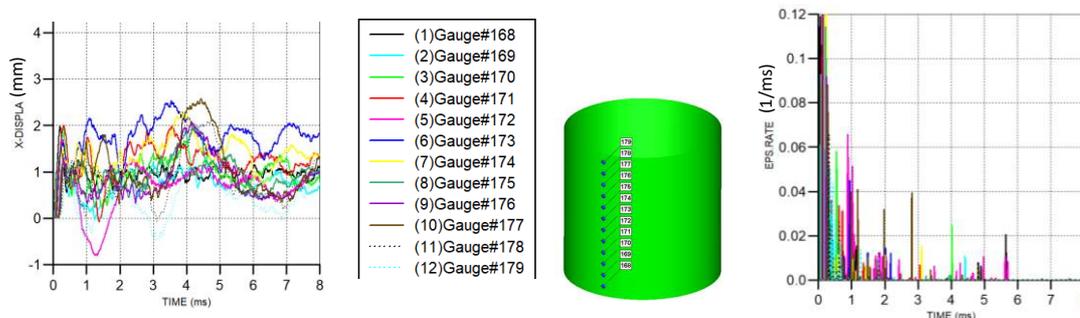


Figura 9: Desplazamientos en la dirección x (radial). a) Efecto de la velocidad de deformación; b) Velocidad de deformación.

## 8 CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran la importancia de la modelación acoplada de la onda explosiva y del tanque para representar la forma y posición del explosivo, las características del terreno y el camino de la onda de presión, incluyendo los obstáculos que pueden actuar como pantalla, pero también reflejan la onda dando lugar a incrementos de las acciones. Un modelo desacoplado o con simplificaciones de la acción explosiva puede ser poco conservador, por lo que es conveniente verificar con un análisis acoplado, luego del diseño. El contenido del tanque disminuye notablemente las deformaciones del mismo debido a la inercia del líquido. Si bien suponerlo vacío puede resultar conservativo para el diseño del tanque frente a cargas explosivas, puede no serlo para el resto de los tanques cuando se modela una batería de tanques.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (PIP 2020 11220200101621CO), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y Fundación YPF (Proyecto PICTO 2021 YPF CUENCA 00008), al CIUNT (Proyecto E727) y a la UNT por el apoyo económico brindado.

## REFERENCIAS

- Duong, D. H., Hanus, J. L., Bouazaoui, L., Penner, O., Moriceau, J., Prod'homme, G. and Reimeringer, M., Response of a tank under blast loading – Part I: Experimental characterization, *Eur. J. 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. and Penner, O., Response of a tank under blast loading – Part II: Experimental structural response and simplified analytical approach, *Eur. J. Environmental and Civil Engineering* 16 [9]: 1042-1057, 2012b.
- Godoy, L.A. and 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. and Chen, G. Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact. *J. Loss Prevent Process Indust* 73 104617, 2021.
- Li, X., Chen, G., Khan, F., Lai, E., and Amyotte, P., Analysis of structural response of storage tanks subject to synergistic blast and fire loads. *J. Loss Prev. Process Ind.* 80, 104891, 2022.
- Lu, S., Wang, W., Chen, W., Ma, J., Shi, Y. and Xu, Ch., Behaviors of thin-walled cylindrical shell storage tank under blast impacts, *Shock and Vibration*, 2019 6515462, 2019.
- Mittal V., Chakraborty Y. and Matsagar V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures* 84: 91–111, 2014.
- Rodriguez Salinas, F., Luccioni B. y M. P. Ameijeiras, Efecto de explosiones externas sobre tanques de combustible, *Mecánica Computacional XL*: 289-298, 2023.
- Rosin, J., Stocchi, A., Bruckhaus, N., Heyner, J., Weidner, P. and Waas, T., Cylindrical Steel Tanks Subjected to Long-Duration and High-Pressure Triangular Blast Load: Current Practice and a Numerical Case Study. *Appl. Sci.* 14, 3465, 2024.
- Rotili, C.F., Beltramo, G., Chimenti, M., Isla, F. and Luccioni, B. Simulación de ensayos de impacto por caída libre de un modelo simplificado de un bulto de transporte de CO-60., *Mecánica Computacional XL*: 619-628, 2023.
- Smith P. y Hetherington J. *Blast and ballistic loading of structures*. Great Britain: Butterworth Heinemann Ltd, 1994.
- Wang, Z., Hu, K. and Zhao, Y. Doom-roof steel tanks under external explosion: Dynamic response and anti-explosion measures, *Journal of Constructional Steel Research* 190, 107118, 2022.