

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE CON TECHO CÓNICO BAJO EXPLOSIONES EXTERNAS.

STRUCTURAL ANALYSIS OF A FUEL STORAGE TANK WITH CONICAL ROOF

Fátima Rodriguez Salinas^a, Bibiana Luccioni^{a,b,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*CIMNE-IBER, <https://cimne-iber.com.ar>*

Palabras clave: Cargas explosivas, Tanques con techo cónico, Distancia escalada, Análisis acoplado.

Resumen. En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento estructural de un tanque de acero con techo cónico soportado sometido a explosiones externas. El problema se modela con un programa multifísica explícito y se realiza un análisis acoplado considerando la interacción entre la onda de presión proveniente de la explosión y el tanque. Por un lado, se estudia la respuesta estructural para distintas masas de explosivo ubicadas a la misma distancia del tanque. Se analizan los desplazamientos y el trabajo plástico del tanque como una medida del daño del material. A partir de estos resultados, se establecen pautas que pueden ser útiles para determinar criterios de seguridad a la rotura de tanques de esta tipología frente a explosiones externas. Por otro lado, se analiza la alternativa de simplificar el modelo simulando la estructura de la cubierta mediante el aumento del espesor de la chapa de la misma. A partir de este análisis, se establece un criterio para la determinación del espesor equivalente frente a explosiones y se compara con los presentados por otros autores para este mismo tanque bajo otras cargas.

Keywords: Blast loads, Tanks with conical roof, Scaled distance, Coupled analysis.

Abstract. This paper presents the structural behaviour of a steel tank with a supported conical roof under external explosions. The problem is modelled with an explicit multi-physics code. A coupled analysis is performed considering the interaction between the blast wave and the tank. First, the structural response is analysed for different explosive masses located at the same distance from the tank. The displacements and the total plastic of the tank are analysed as a measure of the material damage. Based on these results, guidelines are established that may be useful for defining safety criteria for the rupture of this type of tanks under external blasting. Secondly, the alternative of simplifying the model by simulating the roof structure by increasing the thickness of the shell is analysed. Based on the results of this analysis, a criterion for determining the equivalent thickness under blast conditions is established and compared with the criteria presented by other authors for the same tank under other types of loading.

1 INTRODUCCIÓN

Generalmente el almacenamiento de petróleo y sus derivados se realiza en tanques verticales de acero dispuestos en baterías en plantas de refinería. Son estructuras cilíndricas relativamente bajas, con o sin techo, que pueden ser sometidas a cargas explosivas. En las últimas décadas, este tipo de acciones ha generado daños de gran envergadura en la infraestructura de los parques de almacenamiento de hidrocarburos con las correspondientes consecuencias económicas, sociales y ambientales. Se entiende por daño en la estructura de un tanque a cualquier modificación de la geometría o en la funcionalidad durante su vida útil. Puede manifestarse como deformaciones significativas elásticas o plásticas con respecto a la geometría de diseño, aparición o extensión de fisuras, generación de plasticidad localizada o extendida en el material (Ameijeiras 2020). Como ejemplo pueden mencionarse los accidentes de Toulouse, Francia, en 2001 (Duong 2011); Buncefield, Inglaterra, en 2005 (Atkinson 2011) y Bayamón, Puerto Rico, en 2009 (Batista-Abreu y Godoy 2011). Esta situación muestra la necesidad de considerar como acción las cargas explosivas en las normas de diseño de los tanques, especialmente cuando forman parte de infraestructura crítica.

Las plantas de almacenamiento tienen en general dos tipologías de tanques, los abiertos con techo flotante y los cerrados. Estos últimos pueden tener techo fijo con forma de domo, techo plano o techo cónico, autosostenidos o con estructura soporte de cubierta formada por anillos y vigas que apoyan en columnas. A fin de simplificar el modelado de la estructura soporte de la cubierta algunos autores estudiaron la alternativa de reemplazar los anillos y vigas radiales por una cubierta autosostenida de mayor espesor (espesor equivalente) que genere una respuesta estructural del cilindro similar al sistema original. Esta equivalencia depende del tipo de carga: presión uniforme, viento, temperatura (Burgos et al. 2015). En este estudio no se incluyeron las cargas debidas a explosiones externas.

Existen distintos enfoques para obtener la respuesta estructural de tanques bajo cargas explosivas. Hay procedimientos que combinan dos modelos dinámicos desacoplados: uno para la generación de la detonación y su propagación en el aire, y otro para la respuesta estructural. Existen además métodos más simplificados en los que se analiza la respuesta estructural del tanque que recibe cargas variables en el tiempo y en el espacio debidas a ondas provenientes de explosiones externas pre calculadas (Rosin et al. 2024). Los códigos multi-física permiten realizar un análisis acoplado en el que la onda de presión interactúa directamente con las paredes del tanque. Si bien esta metodología requiere mayor tiempo y costo computacional, en los últimos años se ha extendido su utilización (Mittal et al. 2014; Lai et al. 2021; Wang et al. 2022; Rodriguez Salinas et al. 2023; Rodriguez y Luccioni 2024).

En este trabajo se utiliza un enfoque acoplado para analizar un tanque de 30 m de diámetro y 12 m de altura con techo cónico con estructura soporte de cubierta (Figura 1) sometido a explosiones externas. Por un lado, se estudia la respuesta estructural para distintas masas de TNT ubicadas a nivel del suelo y a una distancia fija del tanque. Se calculan los desplazamientos y el trabajo plástico del cilindro como indicador del daño del material en este tipo de tanque. En una segunda etapa, se analiza la posibilidad de reemplazar el techo rigidizado por un techo equivalente autosostenido de espesor mayor al real, pero manteniendo el peso, para lo cual se modifica la densidad del material. Se simula el comportamiento de modelos con distintos espesores de techo y se comparan los resultados con los obtenidos para el modelo correspondiente a la estructura original. A partir de los resultados de este análisis, se establece un criterio para la determinación del espesor equivalente frente a cargas explosivas externas.

2 DESCRIPCION DEL MODELO

2.1 Tanque analizado

Se analiza un tanque de Acero A36 con techo cónico con estructura soporte de cubierta cuya geometría se detalla en la [Figura 1 \(Godoy y Batista Abreu 2012\)](#). Las dimensiones del mismo corresponden a un tanque de la planta de Bayamón y fue diseñado siguiendo los criterios API 650. Tiene una relación altura/diámetro igual a 0.40 y diámetro/espesor variable entre 2400 y 3800.

El cilindro está formado por virolas que varían su espesor en altura. La cubierta no es autosoportada, sino que apoya sobre dos vigas circunferenciales entre la parte superior del cono y la unión con el cilindro, además, en el sentido radial consta de 16 vigas largas, 16 intermedias y 32 cortas ([Godoy y Batista Abreu 2012](#)).

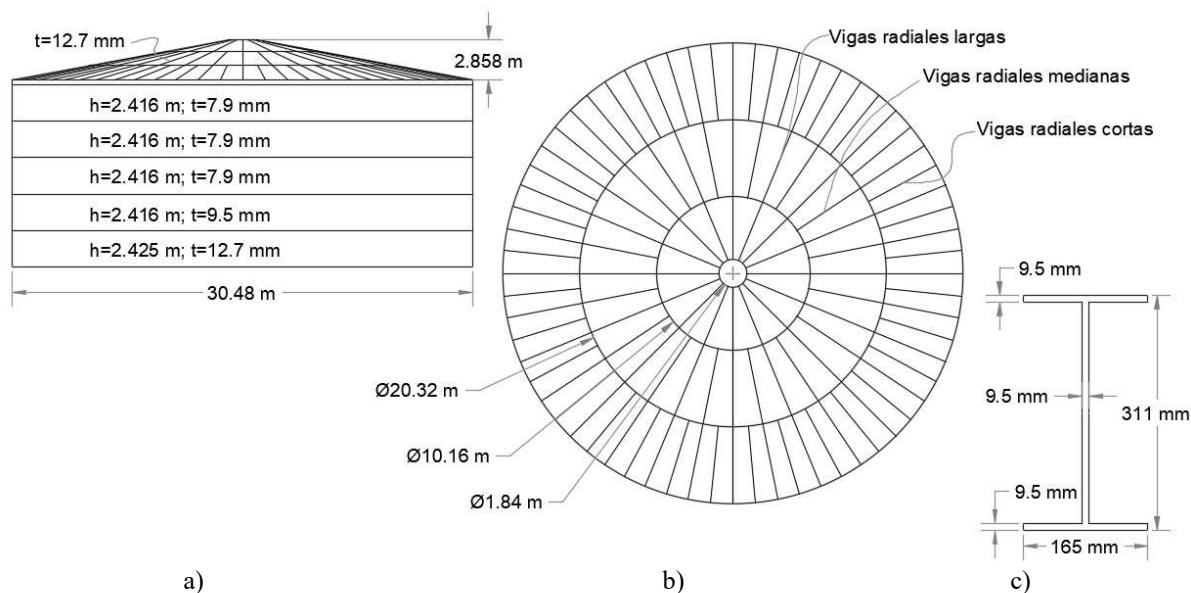


Figura 1. Geometría del tanque y estructura soporte de cubierta ([Godoy y Batista Abreu 2012](#)). a) Vista frontal, b) Vista en planta, c) Sección típica de estructura soporte de cubierta.

Se estudia la respuesta estructural del tanque vacío (situación más desfavorable) sometido a la acción ondas de presión provenientes de la detonación de distintas masas de TNT ubicadas a nivel del suelo y a una distancia fija de 10 m del cilindro. El objetivo es estimar la distancia escalada Z a partir de la cual se produciría la rotura del material del tanque.

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

donde R es la distancia al foco de la explosión en m y W es la masa de TNT en kg.

2.2 Modelo Numérico

Para el desarrollo de los modelos se emplea el programa multi-física explícito AUTODYN incluido dentro de ANSYS Mechanical 2025 R1.

El modelo incluye el aire donde se detona el explosivo y dónde se encuentra inmerso el tanque.

2.2.1 Explosión y propagación de la onda de presión

Por una cuestión de eficiencia computacional, el modelo se divide en dos etapas: la primera

corresponde a la generación y propagación de la onda de presión, y la segunda contempla la interacción con el tanque (Rodriguez Salinas et al. 2023 y Rodriguez y Luccioni 2024).

Para la generación y propagación se modela un cilindro de aire de 10 x 10 m con un procesador Euler-Godunov y se densifica la malla en la zona donde se ubica el explosivo. Cuando el frente de onda de presión llega cerca del borde del primer modelo, se mapea en el modelo 3D.

Para el TNT y el aire se usan los modelos de Jones-Wilkins-Lee (JWL) y gas ideal, respectivamente con los parámetros disponibles en la librería de AUTODYN.

Se estudia el efecto de distintas masas de explosivo: 23, 64, 125, 512, 1000, 1953, 2458, 3044 y 4096 kg de TNT. En todos los casos, la carga explosiva es cilíndrica de radio igual a la altura y el punto de detonación se ubica a 10 m del tanque y a nivel del suelo. Ver [Figura 2a](#).

El modelo 3D de aire consiste en un prisma rectangular de 72 m x 60.76 m x 33 m con procesador Euler FCT, con densificación de la malla en la zona donde se ubica el tanque. Ver [Figura 2a](#). La dimensión de los elementos de menor tamaño es de 317.5 mm. Se definen 12 puntos de control en una línea vertical del aire en las proximidades de la pared del tanque a fin de registrar los valores de la sobrepresión reflejada. Ver [Figura 2b](#).

2.2.2 Tanque

Las paredes del tanque y la cubierta se modelan con elementos de cáscara (*Shell*) de 4 nodos con integración reducida y 3 puntos de integración en el espesor, con control de *hourglass*. Para la estructura soporte de la cubierta se utilizan elementos de vigas. El cilindro se discretiza en 192 elementos circunferenciales de 498 mm y 25 elementos en altura de 486 mm, se respeta el espesor de las virolas según el detalle de la [Figura 1](#). La cáscara de la cubierta se divide en 192 elementos en sentido circunferencial y 28 elementos en sentido radial. Los elementos de viga circunferenciales se discretizan en 192 elementos, las radiales largas en 28, las radiales medias en 20 y las radiales cortas en 10 elementos. En la [Figura 2b](#) se puede ver la discretización del modelo del tanque. La cubierta está unida a la pared cilíndrica. Como condición de borde se restringen todos los desplazamientos en la base del cilindro.

Para el acero A36 se utiliza un modelo elastoplástico J2. Para tener en cuenta el endurecimiento plástico y la dependencia de la resistencia del acero de la velocidad de deformación se usa el modelo de Johnson Cook:

$$\sigma_y = (A + B \bar{\varepsilon}^p)^n [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0)] \quad (2)$$

Donde A representa el umbral de fluencia, B es el módulo de endurecimiento por deformación, C es el coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación, n es el coeficiente de endurecimiento por deformación, σ_y es la tensión efectiva (Von Mises). $\bar{\varepsilon}^p$ y $\dot{\varepsilon}^p$ son la deformación plástica efectiva y la velocidad de deformación plástica efectiva respectivamente y $\dot{\varepsilon}_0$ es la velocidad de deformación de referencia. Los valores utilizados para los parámetros de este modelo, junto con el resto de las propiedades mecánicas del acero A36 se presentan en la [Tabla 1](#). ρ es la densidad, E es el módulo de elasticidad, ν es el coeficiente de Poisson, ε_{u1} y ε_{u2} son la deformación plástica de falla en tracción y corte, respectivamente

ρ [g/cm ³]	E (MPa)	ν	A [MPa]	B [MPa]	C	n	ε_{u1}	ε_{u2}
7.93	200000	0.3	286	510	0.0171	0.228	0.15	0.12

Tabla 1: Propiedades del Acero A36.

Se establece como criterios de falla una deformación principal máxima de 0.15 en tracción

y una deformación angular máxima de 0.12 en corte. Estos valores dependen del tamaño de la malla del tanque y se obtuvieron a partir de los valores de rotura provistos por el fabricante. En el modelo se asocia la erosión de los elementos al criterio de falla. Una vez que se alcanza el criterio de falla, los elementos desaparecen del modelo, pero se conserva la masa de los mismos que se concentra en los nodos que se comportan, de ahí en más, como masas concentradas.

Para registrar los desplazamientos en la pared del cilindro se definen 12 puntos de control sobre la generatriz que forma un ángulo de 0° con el foco de la explosión (Figura 2b). Los puntos que registran mayores desplazamientos son el (6), (7), y (8), que corresponden a alturas de 5.08, 6.05 y 7.01 m medidos desde la base del tanque.

El modelo del tanque está inmerso en el prisma rectangular de aire que contiene la onda de la explosión y se establece la interacción Euler-Lagrange (fluido-estructura) (Figura 2a). Se define también interacción sólido-sólido entre las distintas partes que componen la pared y la cubierta del tanque. El análisis se extiende durante 200 ms lo cual da tiempo al paso de la onda de presión y la estabilización de la vibración del tanque.

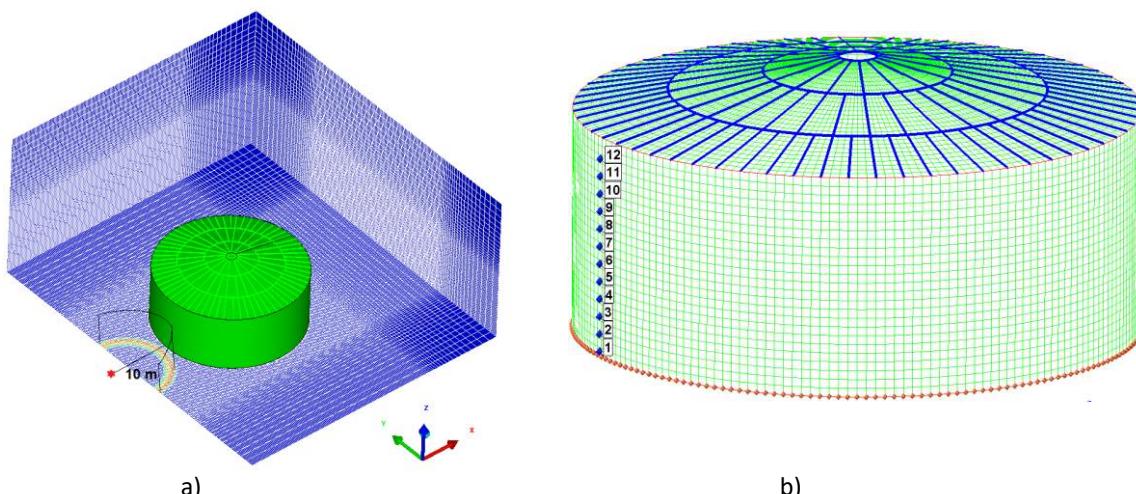


Figura 2. Modelo global. a) Mapeo del de la detonación de la carga explosiva y propagación de la onda de presión en el modelo 3D. b) Mallado del tanque y estructura soporte de la cubierta y puntos de control

3 EFECTO DE LA DISTANCIA ESCALADA.

En esta sección se estudia el efecto de la masa de explosivo en la respuesta del tanque. Para ello se consideran distintas masas de explosivo. En la Tabla 2 se presentan los valores de distancia escalada Z correspondientes a las masas de TNT estudiadas y el valor de la sobrepresión máxima reflejada p_r que alcanza al tanque calculado en cada caso.

W [kg]	23	64	125	512	1000	1953	2458	3044	4096
Z [$m/kg^{1/3}$]	3.51	2.50	2.00	1.25	1.00	0.80	0.74	0.69	0.63
p_r [kPa]	102	242	478	2828	5993	11561	14334	17322	21976

Tabla 2: Masas de TNT, Distancia escalada Z y Sobrepresión máxima reflejada

La relación altura/diámetro del tanque analizado es igual a 0.40 y la relación entre el radio y el espesor de la virola del tanque varía entre 1200 y 1900. Para estos parámetros, se estima una carga crítica dinámica de pico del orden de los 225 kPa (Ameijerias 2020). Se puede observar que para una carga de 64 kg de TNT ($Z=3.51 m/kg^{1/3}$), las sobrepresiones generadas superan los valores correspondientes a la cota inferior de pandeo dinámico estimada por Ameijerias, 2020 para tanques bajo la acción de cargas debidas a ondas explosivas y no en el caso de 23 kg

de TNT.

La [Figura 3](#) muestra el estado del material para distancias escaladas luego de finalizar el análisis (200 ms). Se puede apreciar que para la mayor Z ($3.51 \text{ m/kg}^{1/3}$) analizada el material del cilindro del tanque se mantiene en estado elástico. Para Z menor a $2.50 \text{ m/kg}^{1/3}$ se observa la plastificación y localización de arrugas verticales locales en la cara más próxima a la carga explosiva, lo que evidencia que estas cargas son superiores a la cota inferior de pandeo dinámico. Esto coincide con las consideraciones realizadas teniendo en cuenta el valor de la sobrepresión reflejada ([Tabla 2](#)).

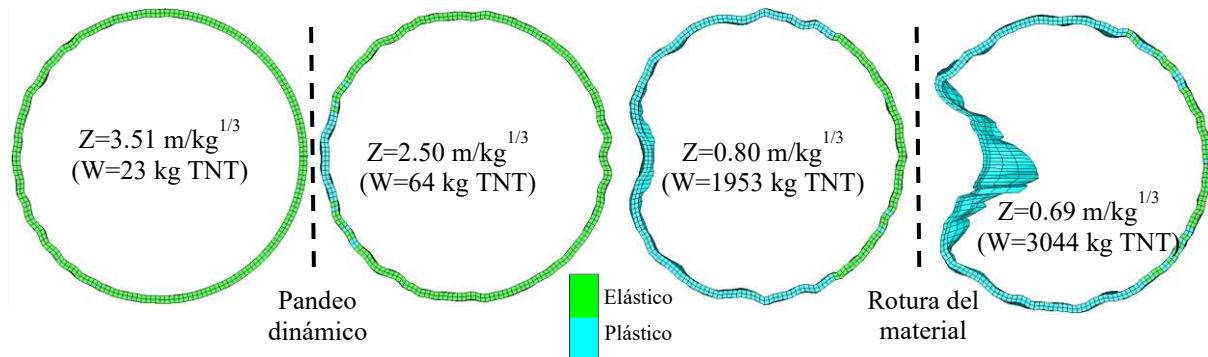


Figura 3. Pandeo, plastificación y rotura para distintas distancias escaladas, $t=200 \text{ ms}$.

En la [Figura 4](#) se muestra la deformación plástica en $t=200 \text{ ms}$ para distintas distancias escaladas. Se puede ver que para Z variando entre 0.74 y $0.69 \text{ m/kg}^{1/3}$ (W entre 2458 y 3044 kg de TNT) las deformaciones plásticas evolucionan y superan el valor definido como falla del material, produciéndose la rotura de la pared cilíndrica del tanque. A medida que aumenta la masa de explosivo (disminuye Z), aumenta el sector de la envolvente del tanque con deformaciones permanentes y la zona más deformada del cilindro se ubica a mayor altura. La rotura del material empieza por la parte inferior del tanque.

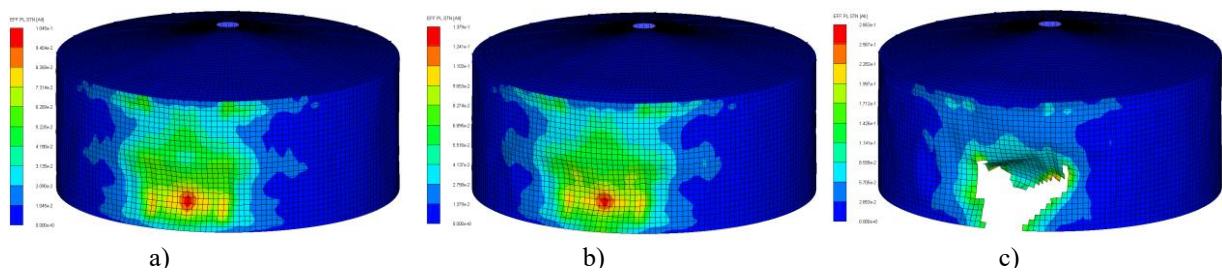


Figura 4. Deformaciones plásticas del cilindro para $t=200 \text{ ms}$. a) $Z=0.80$. b) $Z=0.74$. c) $Z=0.69$. Z en $\text{m/kg}^{1/3}$.

En la [Figura 5](#) se muestran los valores de máximo desplazamiento del punto de control (8) Δx_{max} , las máximas deformaciones plásticas efectivas (EPS) y el máximo trabajo plástico del cilindro (W_p) en función de la distancia escalada. Las gráficas en líneas de trazos corresponden a valores de tendencia si no se considerara la rotura del material.

En la [Figura 5a](#) se observa un fuerte incremento en los máximos desplazamientos a partir de este valor. En la [Figura 5b](#) se puede apreciar también el cambio brusco en las EPS para distancias escaladas menores a $0.70 \text{ m/kg}^{1/3}$. En la [Figura 5c](#) se visualiza cómo aumenta repentinamente el trabajo plástico del cilindro para Z menor a $0.70 \text{ m/kg}^{1/3}$. En todos los casos, al no tener en cuenta la erosión del material del acero del tanque, se alcanzan valores de

desplazamiento, deformación plástica efectiva y trabajo plástico mayores, que en la práctica no se alcanzarían.

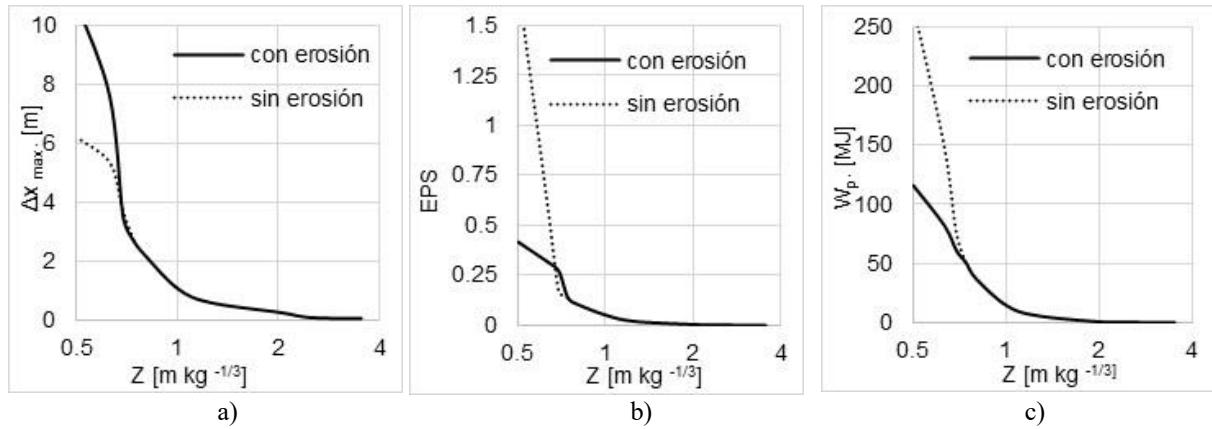


Figura 5: Respuesta del tanque en función de la distancia escalada. a) Desplazamiento máximo; b) Deformación plástica efectiva máxima; c) Trabajo plástico máximo.

4 SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO DE LA ESTRUCTURA SOPORTE DE LA CUBIERTA

Con el objeto de simplificar la modelación de la estructura soporte de la cubierta (formada por columnas, anillos y vigas radiales) y optimizar el tiempo computacional, se realiza una idealización de la misma consistente en reemplazarla por un techo autosoportado de espesor equivalente. De acuerdo con [Burgos et al. \(2015\)](#), el espesor equivalente que conduce a igual rigidez para este tanque es 1.4 veces el espesor original de la cubierta t_o . Haciendo un análisis de estabilidad, para esta equivalencia, la carga crítica correspondiente al primer modo de pandeo resulta menor en todos los casos de carga analizados (carga térmica, presión uniforme o viento). Para estos tipos de carga, los espesores equivalentes que conducen a soluciones coincidentes con las obtenidas con la estructura de la cubierta corresponden a 27, 24 y 40 veces el espesor original, respectivamente ([Burgos et al. 2015](#)). En este trabajo se plantean modelos con distintos espesores equivalentes t_{eq} partiendo de 1.4 t_o . La densidad equivalente del material se modifica con la ecuación $\rho_{eq} = 137.16/t_{eq}$ a los efectos de mantener el peso original del techo ([Burgos et al. 2015](#)). En la segunda columna de la [Tabla 3](#) se muestran los valores de densidad equivalente de la lámina de la cubierta adoptados para los distintos modelos.

t_{eq}/t_o	ρ_{eq} [kg/m 3]	$\Delta x_{max\ eq} - \Delta x_{max\ o}$		$EPS_{eq} - EPS_o$		$W_{p\ eq} - W_{p\ o}$	
		$\Delta x_{max\ o}$ [%]	Z	EPS_o [%]	Z	$W_{p\ o}$ [%]	Z
1.4	7714	+1.7	Z=0.74	+4.8	Z=0.74	+4.8	Z=0.69
4	2700	+0.8	Z=0.69	+2.0	Z=0.69	+2.0	Z=0.69
8	1350	-0.5	Z=0.69	+2.7	Z=0.69	+2.7	Z=0.69

eq: modelo con espesor equivalente. o: modelo con estructura soporte de cubierta

Tabla 3: Densidad equivalente y relación porcentual de parámetros entre espesor equivalente y con estructura de cubierta

Teniendo en cuenta las observaciones de la Sección 3 que muestran que el material del tanque se rompe para distancias escaladas entre 0.74 y 0.69 m/kg $^{1/3}$, se analiza la respuesta estructural de los modelos simplificados mostrados en [Tabla 3](#) para estas dos distancias

escaladas. En la misma tabla se presenta un resumen de los resultados, donde se puede visualizar la diferencia porcentual para cada parámetro del modelo equivalente (máximo desplazamiento del tanque en la dirección x Δx_{max} , deformación plástica efectiva EPS y trabajo plástico W_p) respecto del modelo con estructura original. Teniendo en cuenta que el trabajo plástico máximo del cilindro W_p es una medida integral del comportamiento, para la cubierta autosostenida analizada se podría considerar un de espesor equivalente a 4 veces el espesor real ($t_{eq} = 4t_o$).

En la [Figura 6](#) y en la [Figura 7](#) se presentan las deformaciones plásticas equivalentes obtenidas con distintos espesores equivalentes de cubierta ($1.4 t_o$, $4 t_o$ y $8 t_o$) para $Z=0.74 m/kg^{1/3}$ y $Z=0.69 m/kg^{1/3}$, respectivamente. La comparación con las [Figura 4b](#) y [4c](#) muestra que las distribuciones de EPS son similares para los distintos espesores equivalentes.

Para $Z=0.74 m/kg^{1/3}$ los EPS máximos obtenidos con espesor de cubierta equivalente son siempre menores que los obtenidos con la estructura de techo ([Tabla 3](#)).

En el caso de $Z=0.69 m/kg^{1/3}$, a la que ya produce la rotura del material, las EPS máximas son mayores que las obtenidas con la estructura del techo, tienen mayor diferencia porcentual respecto a las mismas que para $Z=0.74 m/kg^{1/3}$ y la diferencia aumenta con el espesor equivalente. Ver [Tabla 3](#).

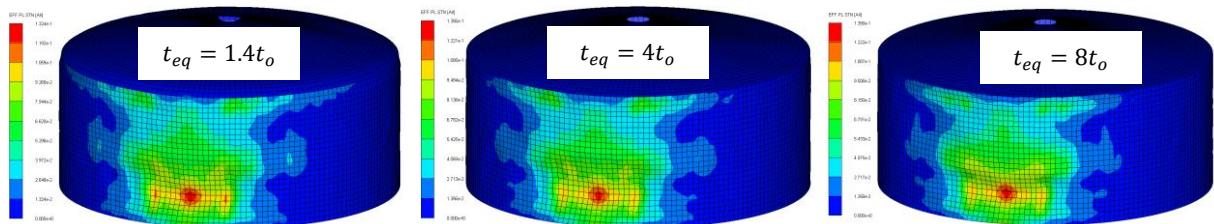


Figura 6: Deformaciones plásticas en modelos con techo equivalente para $Z=0.74 m/kg^{1/3}$, $t=200ms$

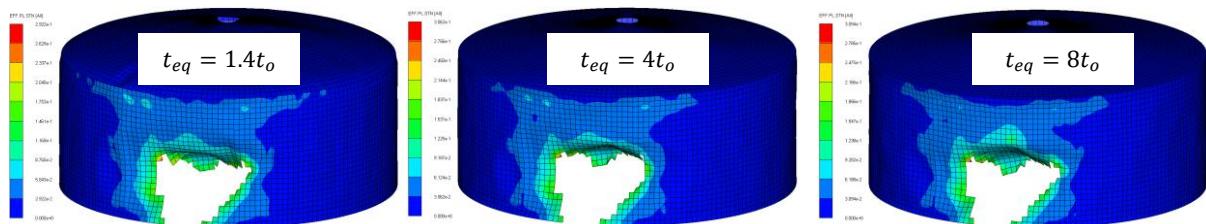


Figura 7: Deformaciones plásticas en modelos con techo equivalente para $Z=0.69 m/kg^{1/3}$, $t=200ms$

En la [Figura 8](#) se muestra la variación de los desplazamientos máximos de la pared del tanque, la deformación plástica efectiva máxima y el trabajo plástico máximo con la distancia escalada para los modelos con estructura de cubierta y con techo de espesor equivalente $t_{eq} 4 t_o$. Puede observarse que el modelo simplificado aproxima bastante al del techo soportado, principalmente para distancias escaladas altas.

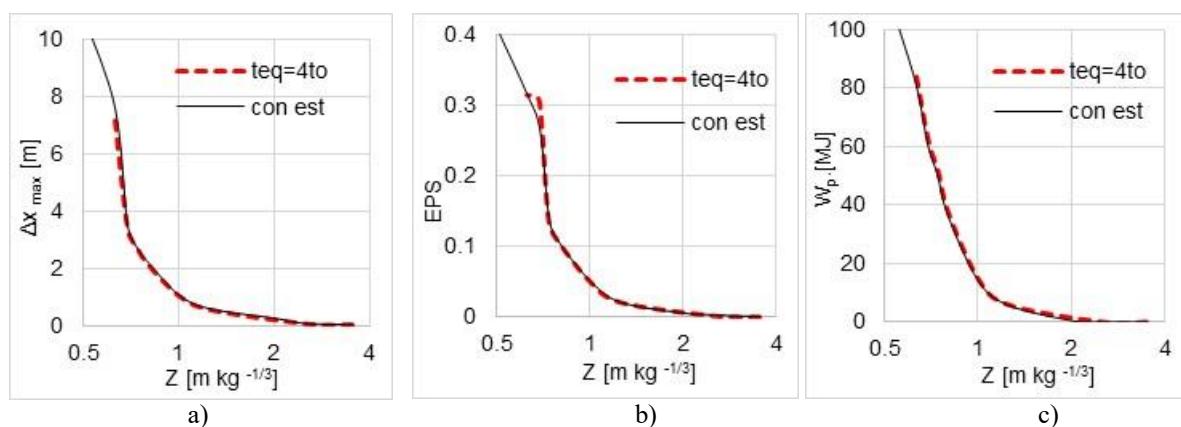


Figura 8: Comparación de parámetros entre techo con estructura soporte y modelo con espesor equivalente de cubierta $4t_0$ en función de la distancia escalada. a) Máximos desplazamientos. b) Deformación plástica. c) Trabajo plástico del cilindro.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analiza la respuesta estructural de un tanque con techo cónico soportado sometido a explosiones externas correspondientes a distintas masas de TNT posicionadas a nivel de piso y a una distancia fija del tanque.

El aumento repentino de los desplazamientos, deformaciones plásticas y trabajo plástico del tanque indican la rotura del material. La misma se produce en la parte inferior de la pared del tanque para distancias escaladas entre 0.74 y $0.69\ m/kg^{1/3}$. Estas distancias escaladas son mucho menores que las correspondientes al padeo dinámico del tanque. Por otro lado, cuando se produce la rotura de la pared, el tanque presenta valores de deformación y desplazamiento tan grandes, que ya se encuentra fuera de servicio.

En una segunda etapa, se analiza la respuesta estructural del cilindro del tanque al reemplazar el techo cónico soportado por un techo autosoportado de un espesor equivalente. Los resultados muestran que, para una carga explosiva ubicada a nivel del suelo a $10\ m$ del tanque, se puede simplificar todo el techo por un cono autoportante de espesor $4t_0$. Esta simplificación reduce considerablemente el tiempo de elaboración y corrida del modelo y muestra ser aceptable para distancias escaladas grandes. Teniendo en cuenta que para distancias escaladas bajas, las deformaciones son importantes y el tanque pierde operatividad, se puede emplear este espesor equivalente para analizar el comportamiento de este tipo de tanques frente a cargas explosivas.

Sería importante repetir el estudio para tanques de otras dimensiones y distintas distancias del explosivo al tanque, a los efectos de evaluar la posibilidad de extraer los resultados de este trabajo a esos casos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (PIP 11220200101621) y a la UNT (PIUNT CX-E727) por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

Ameijeiras, M. *Análisis de tanques de almacenamiento de petróleo bajo la acción de cargas debidas a ondas explosivas*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2020
 Atkinson, G. Blast damage to storage tanks and steel-clad buildings. *Process Safety and Environmental Protection*. 89; 382-390, 2011
<http://doi:10.1016/j.psep.2011.06.020>

Batista-Abreu, J. y Godoy, L.A. Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11 (2): 109-122, 2011

Burgos, C. A., Batista-Abreu, J. C., Calabró, H. D., Jaca, R., Godoy, L. A. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder. *Thin-Walled Structures*, 91:29-37, 2015
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.02.006>

Duong, D. H., Bouazaoui, L., Pennetier, O., Hanus, J. L., Prod'Homme, G., Reimeringer, M. Etude des effets d'une explosion externe sur des réservoirs cylindriques : caractérisation du chargement. *20ème Congrès Français de Mécanique. Besançon*, 1-6, 2011

Godoy LA, Batista-Abreu J. Buckling of fixed roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire. *Thin-Walled Structures*, 52:90–101, 2012
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.005>

En Lai, Jie Zhao, Xiaofeng Li, Kun Hu, Guohua Chen. Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 73:104617, 2021
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104617>

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.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.06.004>

Myers, P. *Aboveground Storage Tanks*, McGraw Hill, 1997

Rodriguez Salinas, F., Luccioni B. y M. P. Ameijeiras, Efecto de explosiones externas sobre tanques de combustible. *Mecánica Computacional XL*: 289-298, 2023.

Rodriguez Salinas, F. y Luccioni, B, Simulación acoplada de explosiones externas sobre tanques de almacenamiento metálicos. *Mecánica Computacional XLI*: 217-226, 2024
<https://doi.org/10.70567/mc.v41i4.22>

Rosin, J., Stocchi, A., Bruckhaus, N., Heyner, J., Weidner, P., Waas, T. Cylindrical steel tanks subjected to long-luration and high-pressure triangular blast load: Current practice and a numerical case study. *Applied Sciences*, 14, 3465, 2024.
<https://doi.org/10.3390/app14083465>

Wang Z, Hu K, Zhao Y. Doom roof steel tanks under external explosion: Dynamic responses and anti-explosion measures. *Journal of Constructional Steel Research*, 190. 107118, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107118>