

## INCIDENCIA DEL TIEMPO DE ARRIBO DE ONDA EN LA RESPUESTA DE TANQUES SOMETIDOS A EXPLOSIONES EXTERNAS

Mariano P. Ameijeiras <sup>a</sup>, Luis A. Godoy <sup>b</sup>, David C. Weggel <sup>c</sup>, Matthew J. Whelan <sup>c</sup>

<sup>a</sup> FCFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, [m.ameijeiras@gmail.com](mailto:m.ameijeiras@gmail.com)

<sup>b</sup> FCFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba y CONICET, Argentina,  
[luis.godoy@gmail.com](mailto:luis.godoy@gmail.com)

<sup>c</sup> Infrastructure Security and Emergency Responder Research and Training (ISERRT) Facility,  
Department of Civil and Environmental Engineering, University of North Carolina, Charlotte, USA

**Palabras clave:** Explosiones, Pandeo dinámico, Presiones debidas a explosiones, Tanques cilíndricos, Tiempo de arribo, Vibraciones

**Resumen.** En un trabajo anterior sobre el tema, los autores analizaron el comportamiento de un tanque de petróleo típico bajo la influencia de ondas explosivas. En ese caso se obtuvo la respuesta al evento considerando la distribución espacial de un pulso explosivo cuyo instante de inicio y duración era el mismo independientemente de la posición considerada en sentido circunferencial. Sin embargo, existe un retardo en la llegada de la onda explosiva entre los puntos más cercanos al foco de la explosión y el resto de la estructura. En este trabajo se analiza la incidencia de ese retardo o tiempo de arribo (*TOA*, *Time Of Arrival*) de la acción según la coordenada circunferencial bajo la suposición que el pulso dura lo mismo independientemente de la ubicación en el espacio. Este trabajo usa estudios experimentales llevados a cabo sobre un tanque rígido a escala reducida, abierto superiormente, e instrumentado para medir presiones e impulsos producidos por una explosión controlada y escalando la onda modelo/prototipo bajo la regla de Hopkinson, validada por muchos experimentos con una gran cantidad de cargas explosivas sólidas y gaseosas. El análisis estructural consiste en la determinación de los valores de inestabilidad dinámica o críticos para varios tiempos de duración de la fase positiva considerando el *TOA* y la distribución espacial experimental de tensiones, los que se comparan con curvas obtenidas por los autores para el caso de tiempos de arribo iguales independientes de la coordenada circunferencial. Para analizar el comportamiento del tanque y obtener resultados se realizan análisis dinámicos no lineales implícitos. Para establecer un estado límite, se utiliza el criterio desarrollado originalmente por Simitsev y extendido por los autores para el caso de ondas explosivas.

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante la última década, las industrias química y petroquímica han prestado especial atención a los efectos causados por explosiones sobre la infraestructura en plantas industriales, refinerías y granjas de almacenamiento de combustible. Los orígenes de tales explosiones pueden provenir de diversas causas, incluyendo accidentes operativos, fuego y acción intencional de sabotaje. Taveau (2011) reporta ejemplos de accidentes ocurridos en Francia y en otros países sobre explosiones en tanques para indicar la posible secuencia de accidente y resaltar las consecuencias esperables. Ejemplos recientes de tanques dañados por efecto de explosiones se ilustran en la Figura 2 para el accidente de Buncefield (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008; Atkinson, 2011) y de Bayamón (Batista-Abreu y Godoy, 2011).



Figura 1: Daños en tanques de almacenamiento de combustibles debidos a explosiones. (a) Buncefield, UK, 2005; (b) Bayamón, Puerto Rico, 2009.

El mayor esfuerzo por comprender problemas de explosiones en tanques de almacenamiento de productos combustibles ha sido realizado recientemente en Francia. El objetivo general del estudio francés es establecer un análisis probabilístico de condiciones umbrales de explosión para las que son de esperar distintos niveles de daño (Noret et al., 2012), algo semejante a un análisis de vulnerabilidad. Estos autores reportan experimentos de explosiones sobre un modelo de tanque instrumentado para registrar valores de sobrepresiones y tiempos de actuación (Duong et al., 2012a) y usan esa información para realizar análisis simplificados (Duong et al., 2012b).

Una descripción de la mecánica y las variables involucradas en el fenómeno explosivo puede verse por ejemplo en Glasstone y Dolan (1977), UFC 3-340-02 (2008), entre otros. La distribución espacial está descrita en un número muy limitado de publicaciones (Noret et al., 2012; Duong et al., 2012a; Duong et al., 2012b). Atkinson (2011) reporta que los tanques de Buncefield se diseñaron para resistir presiones de viento de 0.6KPa, y con respecto a las explosiones aventura que “debido a que las presiones se elevan en un periodo de varias centenas de milisegundos, la respuesta estructural del tanque puede ser comprendida mediante un análisis cuasi-estático”. Por el contrario, se ha demostrado que la respuesta frente a una carga explosiva difiere significativamente de la respuesta tomada como cuasi-estática o aún como carga escalón, por lo que surge la necesidad de llevar a cabo estudios de dinámica no lineal bajo cargas impulsivas para representar efectos de explosiones (Ameijeiras y Godoy,

2013).

En este trabajo se adopta la distribución que surge de ensayos llevados a cabo en la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte (UNCC, [Weggel y Whelan, 2012](#)), y se presta especial atención al efecto producido por diferencias en el tiempo de arribo de la onda que ocurre alrededor de la circunferencia de un tanque. Este efecto no ha sido considerado anteriormente en la literatura, y representa una primera visión sobre el problema.

## 2 PRESIONES DEBIDAS A ONDAS EXPLOSIVAS

### 2.1 Principales resultados de ensayos en UNCC

La distribución espacial de sobrepresiones obtenida en los ensayos de [Weggel y Whelan \(2012\)](#), para un tanque cilíndrico modelo (3.0ft de diámetro, 2.4ft de altura y 3/8in de espesor), a la que se le dio continuidad y ajuste mediante una serie de Fourier y se normalizó con respecto de la presión máxima, responde a la serie:

$$p_n(\theta) = \sum_{i=0}^8 c_i * \cos(i * \omega * \theta) \quad (1)$$

donde  $\omega = 0.019912$ ,  $\theta$  es la coordenada circunferencial en grados y los coeficientes  $c_i$  se obtienen de la [Tabla 1](#). Se ha observado que la distribución espacial es, en términos prácticos, independiente de la coordenada de altura.

$c_0$	0.303210
$c_1$	0.345470
$c_2$	0.152380
$c_3$	0.066165
$c_4$	0.039755
$c_5$	0.036498
$c_6$	0.032713
$c_7$	0.024350
$c_8$	0.014721

Tabla 1: Coeficientes de Fourier para presiones normalizadas

[Ameijeiras y Godoy \(2013\)](#) utilizaron la distribución de la [Tabla 1](#) para analizar el comportamiento de un tanque cilíndrico de pared delgada y espesor uniforme. En ese trabajo las presiones consideradas punto a punto actúan al mismo tiempo y con la misma duración del pulso independientemente de la coordenada circunferencial de la cáscara cilíndrica. Sin embargo, existe un retardo de la onda entre el punto más cercano al foco de la explosión y el resto de la estructura (*TOA, Time Of Arrival*). Este retardo fue medido por las experiencias indicadas obteniéndose la siguiente expresión en milisegundos que ajusta los resultados discretos:

$$TOA_p(\theta) = 34637480.3755[1 - \cos(\omega * \theta)] \quad (2)$$

donde  $\omega = 2.407 * 10^{-6}$  y  $\theta$  la coordenada circunferencial en grados.

En los gráficos de la [Figura 2](#) y de la [Figura 3](#) pueden verse las distribuciones medidas.

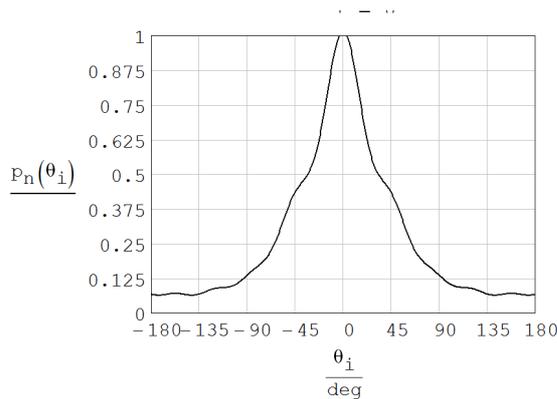


Figura 2: Distribución espacial normalizada de presiones

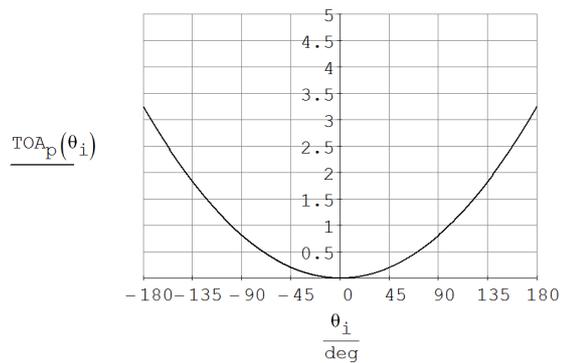


Figura 3. Tiempo de arribo de onda (ms)

### 2.2 Factor de escala de longitudes, tiempos y presiones

Un modelo a escala es una versión reducida de un prototipo donde las dimensiones se reducen (en general) por una constante conocida como “factor de escala de longitudes”,  $\lambda$ . Además, todas las cargas externas que actúan en puntos homólogos lo hacen en tiempos homólogos. El caso del tanque objeto de este trabajo presenta los mismos materiales que el modelo y se supone que las ondas explosivas se propagan en el mismo medio.

Los fenómenos asociados con explosiones derivan en ondas de choque. Estas ondas son una consecuencia directa de la compresibilidad del medio, por lo que es importante asegurar similitud de los efectos de compresibilidad. Para ello se deberá satisfacer la similitud de Mach (Snay, 1961). Haciendo uso de esta (para el mismo medio de propagación de onda en el modelo y en el prototipo) se llega a:

$$p_m = p_p \tag{3}$$

$$\tau = \lambda \tag{4}$$

siendo  $p_m$  la presión en el modelo;  $p_p$  la presión en el prototipo y  $\tau$  el factor de escala de tiempo. Esto indica que para el uso de datos experimentales en el tanque tipo objeto de este estudio, la distribución espacial de presiones deberá permanecer invariante, en tanto que el tiempo de arribo tendrá que ser escalado convenientemente según se ha mostrado.

## 3 ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE EFECTOS DE EXPLOSIONES CON EFECTO DE RETARDO SOBRE UN TANQUE TIPO

### 3.1 Modelo de tanque utilizado para estudios numéricos

En lo sucesivo se analiza un tanque cilíndrico de pared delgada y espesor uniforme con las características geométricas y mecánicas indicadas en la [Tabla 2](#).

Diámetro $D$ [m]	Altura $L$ [m]	Espesor $h$ [m]	$D/L$	$D/h$	Módulo elast. longitudinal $E$ [GPa]	Módulo de Poisson $\nu$	Densidad $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensión fluencia $\sigma_y$ [MPa]
33.2500	8.3125	0.0095	4	3500	200	0.3	7850	250

Tabla 2: Propiedades geométricas y mecánicas del tanque analizado

En la [Figura 4](#) se muestra la descripción de algunos de los parámetros referidos a la

geometría del tanque a utilizar durante este informe. La Figura 5 describe la idealización de la curva de presiones en el tiempo sobre cada punto de la cáscara cilíndrica,  $p_r=f(t)$ , siendo  $p_r$  la acción reflejada sobre la cáscara (Gao y Hoo Fatt, 2012; Kowal-Michalska et al., 2011; Ngo et al., 2007, entre otros).

En un trabajo previo, los autores mostraron el comportamiento de un tanque tipo teniendo en cuenta la distribución espacial de presiones indicadas en la expresión (1). Allí se suponía que el tiempo de arribo y la duración del pulso,  $T_0$ , eran los mismos para todos los puntos de la cáscara. En este trabajo se incluye la función de arribo  $TOA$  convenientemente escalada según lo comentado, mientras que se mantiene la simplificación referente a idéntica duración de la acción independientemente de la coordenada circunferencial.

El tanque se modela estando vacío, abierto en su parte superior (sin techo), de geometría sin imperfecciones, con valor máximo de presiones,  $p_r$ , en  $\theta=0^\circ$  es decir, el frente de ondas viene desde la dirección  $+X$ .

De lo mencionado surgen los gráficos de la Figura 6, donde se muestra la historia de presiones en el tiempo para un  $T_0 = 62.5ms$  y para distintos instantes  $t$  (10ms, 25ms, 50ms y 75ms).

Es útil mencionar que los gradientes de presiones e impulsos en la altura  $L$  del tanque, resultan despreciables (Weggel y Whelan, 2012). Esta conclusión será válida en tanto  $R > 2L$ , siendo  $R$  la distancia foco-estructura (denominada en inglés como *stand-off distance*).

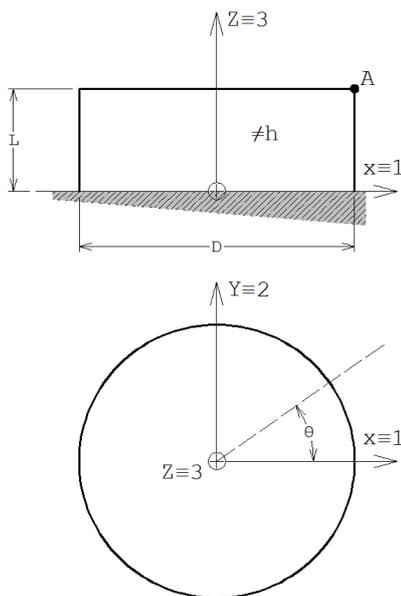


Figura 4: Definición de parámetros geométricos del modelo

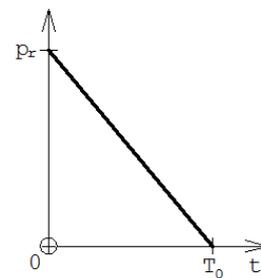


Figura 5: Modelo adoptado de sobrepresión reflejada sobre la estructura

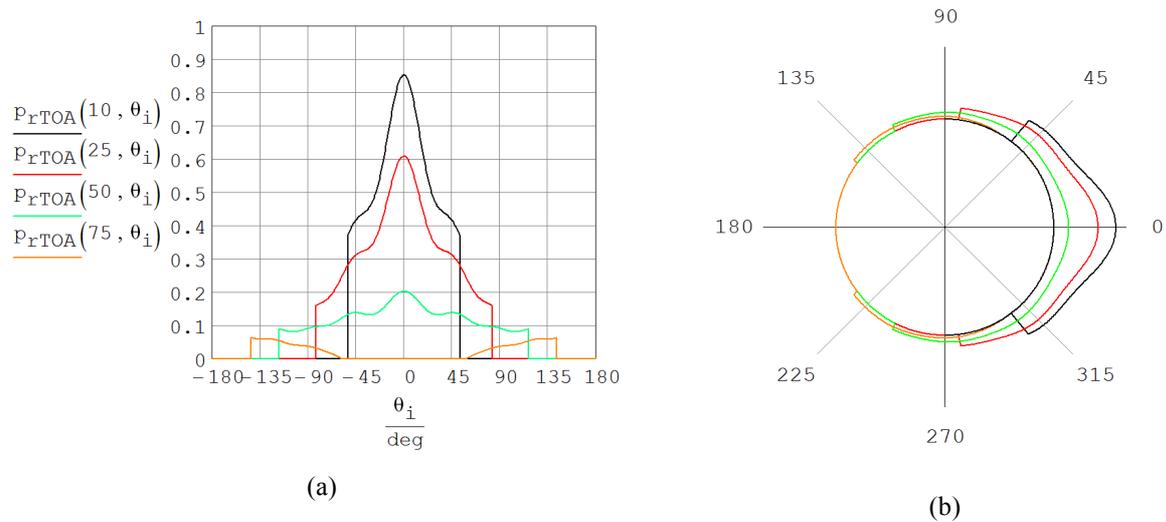


Figura 6: Distribución de presiones normalizadas teniendo en cuenta el retardo para distintos instantes  $t$  (10ms, 25ms, 50ms y 75ms). (a) Distribución espacial en coordenadas rectangulares; (b) distribución espacial en coordenadas cilíndricas.

### 3.2 Análisis estático no lineal

Para ilustrar el tipo de comportamiento esperable en esta clase de problemas, se ha modelado el tanque usando el método de los elementos finitos (FEM), utilizando análisis no lineales geométricos y de material (GMNA), con elementos de cáscara de cuatro nodos con integración reducida.

Como modelo del material se emplean función de fluencia y de potencial plástico según el criterio de von Mises, bajo la suposición de plasticidad perfecta. Si bien los modelos realizados permiten comportamientos de material tanto elásticos como plásticos, para este caso de estudio, se alcanza plasticidad sólo para muy grandes desplazamientos poscríticos, por lo que no se hará ninguna otra consideración referida a plasticidad en lo que resta de este trabajo.

En primer lugar se determina, para referencia, la trayectoria de equilibrio estático empleando un análisis no lineal, en el que el parámetro de avance no es la carga misma, sino alguna medida que permita tanto incrementos como disminuciones en la carga. El algoritmo empleado es el conocido como algoritmo de Riks (1979). En la Figura 7 se observa la trayectoria no lineal de equilibrio expresada mediante el desplazamiento del punto A. En su parte inicial, la trayectoria es casi lineal, con pequeños desplazamiento, hasta que se alcanza un punto de máxima que corresponde a un punto límite en la teoría de estabilidad. El valor de la presión máxima determinada en el punto límite es  $\lambda_{st} = 2103.6$ , que se alcanza para un desplazamiento  $U_{IA} = -9.6 \times 10^{-3}$ . A partir de ese estado, la trayectoria cae, indicando una pérdida de estabilidad en estados poscríticos. El valor de la presión de bifurcación es ligeramente mayor que el de punto límite ( $\lambda_c = 2120.9$ ). Esta trayectoria se traza para un punto específico de la cáscara, pero para otros puntos en los que haya desplazamientos en el modo crítico significativos se encuentra una trayectoria similar.

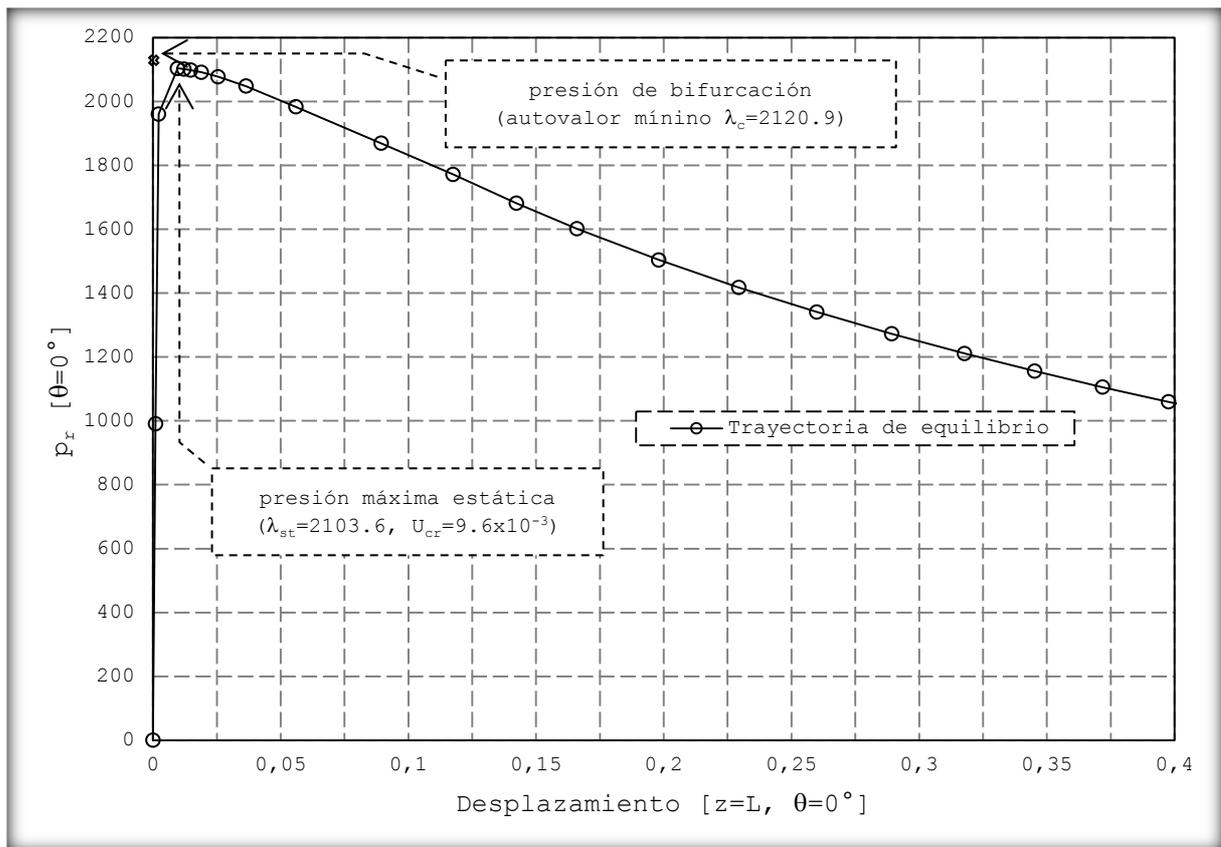


Figura 7: Trayectoria de equilibrio para el punto A, que se muestra en la Figura 3.

### 3.3 Análisis dinámico no lineal

Luego se realizan análisis dinámicos implícitos, con amortiguamiento de Rayleigh ( $\alpha = 0,41$ ,  $\beta = 9,6 \times 10^{-4} s$ ) para funciones de carga-tiempo del tipo explosivas con y sin función de arribo  $TOA$ , con las siguientes duraciones,  $T_0$ , del pulso:  $250ms$ ,  $125ms$ ,  $62,5ms$ ,  $31,25ms$ ,  $15,625ms$ . Para cada caso y duración de impulso se obtiene una respuesta en el tiempo, considerando un punto determinado de la estructura. Sin embargo, debido a restricciones de espacio de este escrito, solo se reporta el valor máximo alcanzado en cada análisis oscilatorio computado bajo la carga que simula la explosión.

Los gráficos de la Figura 8 y de la Figura 9 indican los desplazamientos máximos,  $U_{IA}$ , para presiones reflejadas crecientes con y sin  $TOA$ . Cada punto de la curva representa el máximo de respuesta transitoria.

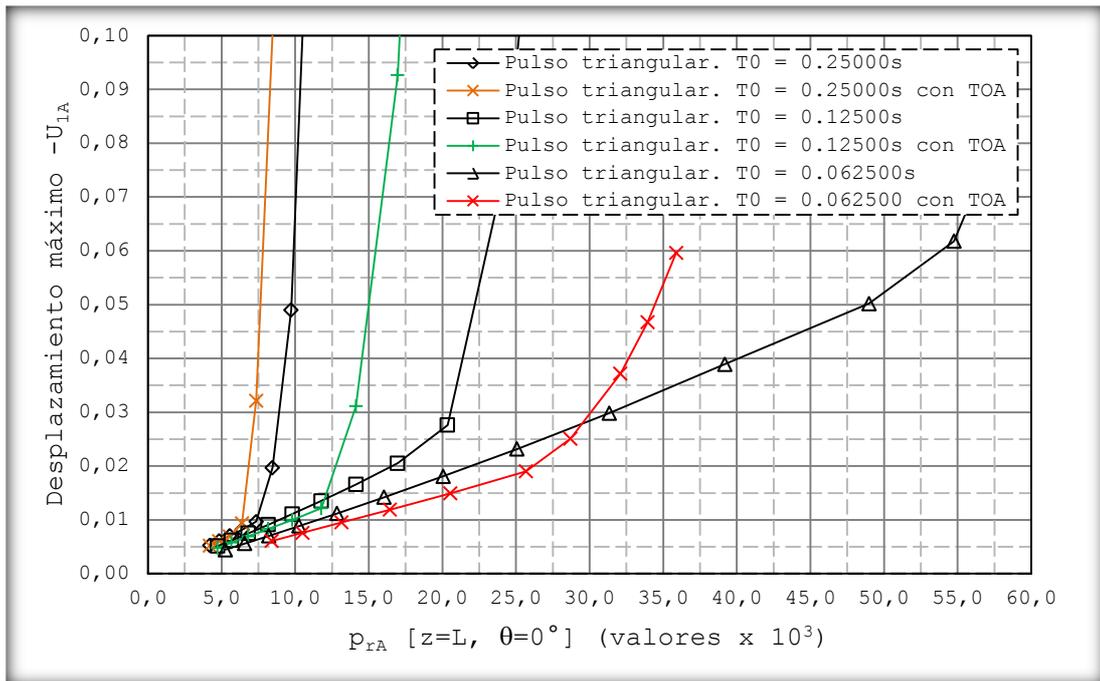


Figura 8: Influencia de la presión y de la duración del pulso. Máximos desplazamientos  $U_{IA}$  para duplas  $p_{rA}$ - $T_0$  con y sin TOA

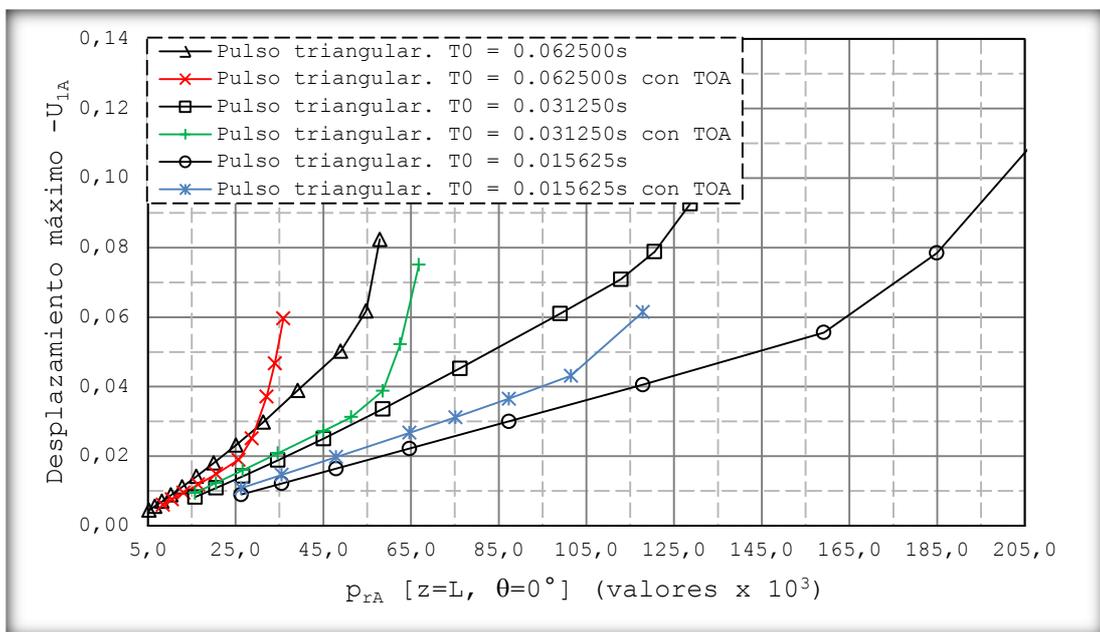


Figura 9: Influencia de la presión y de la duración del pulso. Máximos desplazamientos  $U_{IA}$  para duplas  $p_{rA}$ - $T_0$  con y sin TOA

Para diferenciar mejor los resultados, se han separado los mismos en dos figuras, de manera que los impulsos de mayor duración se grafican en la [Figura 8](#) y los de menor duración en la [Figura 9](#). Debido a que se grafican desplazamientos versus presiones, por analogía con casos estáticos, estas curvas han sido designadas como trayectorias de pseudo-equilibrio (Virella et al. 2006).

### 3.4 Estados límites en el análisis dinámico no lineal

El criterio clásico de pandeo dinámico bajo cargas tipo escalón es el de Budiansky (1967). Sin embargo, la situación cambia cuando las cargas dinámicas son alternadas, como en una carga sísmica, o son de muy corta duración y dejan al sistema oscilando sin carga. En el contexto de cargas sísmicas, en lugar de emplear el criterio de Budiansky para pandeo dinámico, se ha desarrollado un criterio basado en cambios significativos de la pendiente de la trayectoria de pseudo-equilibrio como forma de identificar el estado límite que alcanza el sistema estructural (Virella et al. 2006). Simites (1990) define un movimiento como inestable si la trayectoria que sigue la estructura frente a una carga dada pasa sobre o encierra otros puntos de equilibrio estático (estable o inestable).

Se ha observado en el caso de estudio que la aplicación de la carga hace que la deformación del tanque pase por sobre la deformación estática crítica y luego, debido a la energía elástica acumulada, se recupere y oscile alrededor de la posición indeformada. Siguiendo la definición de Simites (1990), se cortaron las gráficas de la Figura 8 y de la Figura 9 por un desplazamiento igual al crítico estático calculado según el análisis de Riks ( $U_{IA} = -9.6 \times 10^{-3} = U_{cr}$ ) y se obtuvo la gráfica de la Figura 10. Esta gráfica es de forma hiperbólica, donde se observa una zona donde las cargas críticas tienden a la estática y a las repentinas de duración infinita (para “grandes” tiempos  $T_0$ ) y un sector de cargas debidas a pulsos explosivos, donde la curva crece hiperbólicamente.

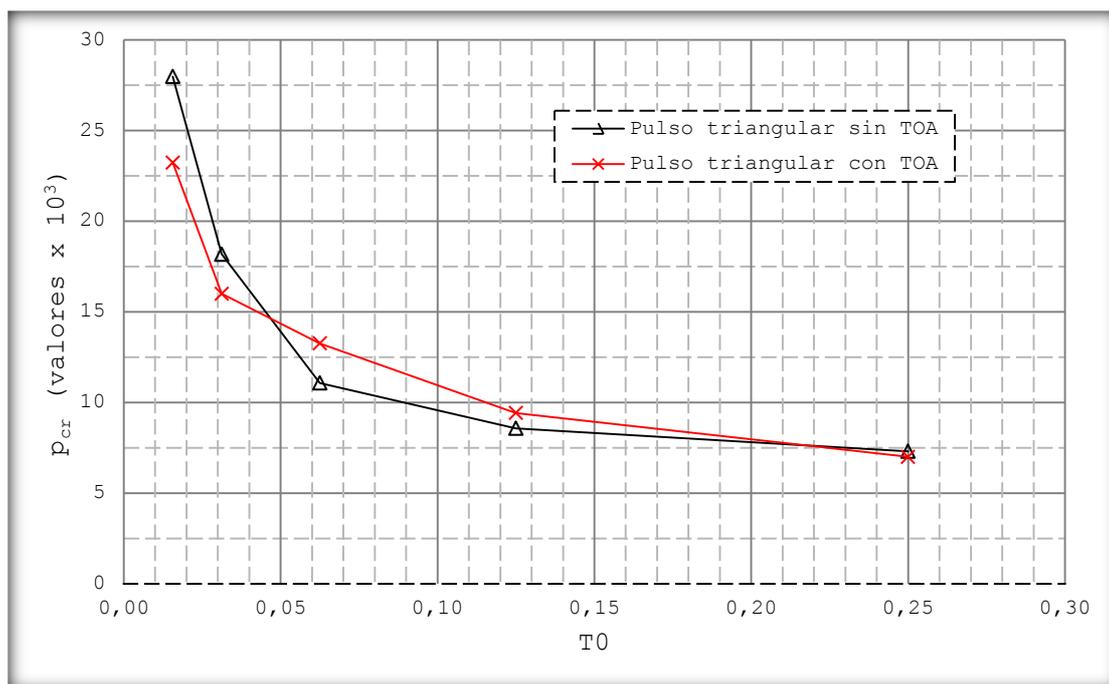


Figura 10: Presión crítica  $p_{rA}$  definida para distintas duraciones de tiempo de aplicación  $T_0$  del pulso.

Se observa en el gráfico de la Figura 10 y bajo la conceptualización de estado límite mencionada, que los valores que representan los estados críticos con y sin TOA no difieren en forma significativa para el desplazamiento límite considerado como crítico,  $U_{cr}$  ( $-9.6 \times 10^{-3}$ ). Las diferencias que se ven en el gráfico citado corresponden a la inclusión del TOA en los análisis. Esta diferencia incrementa para desplazamientos mayores al considerado como crítico según se observa en los gráficos de la Figura 8 y de la Figura 9.

En la Figura 11 se ha graficado la evolución del impulso crítico en el punto A para distintos valores de la duración del pulso con y sin la influencia del TOA y se han ajustado

linealmente ambos comportamientos.

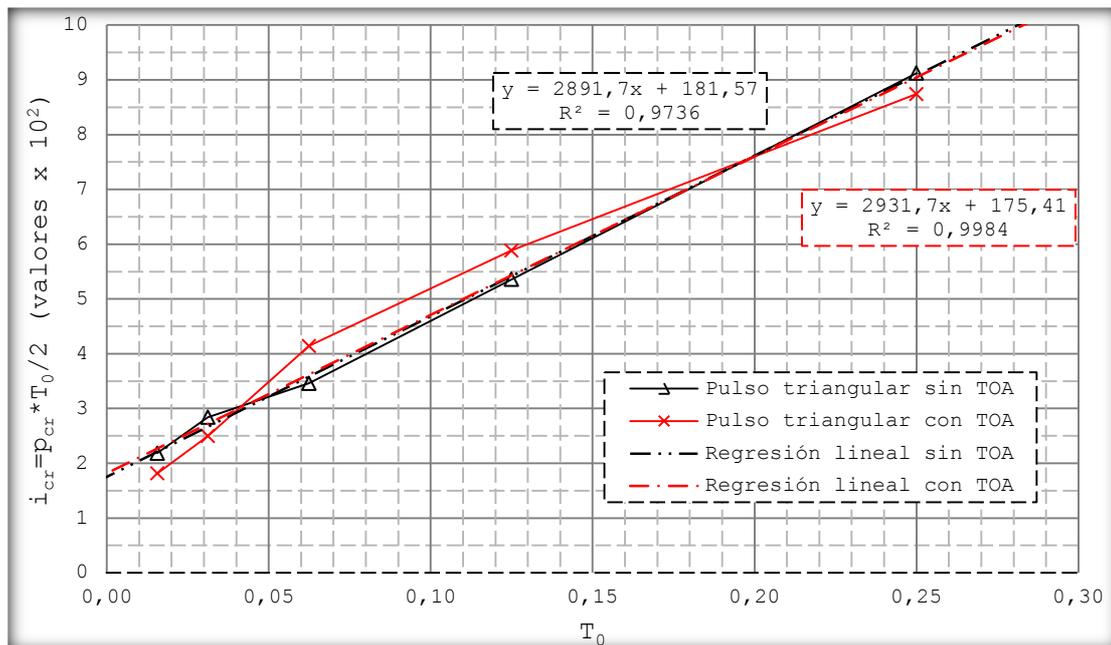


Figura 11: Impulso crítico para distintas duraciones  $T_0$  del pulso

#### 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se reportan resultados computacionales no lineales dinámicos basados en presiones que fueran obtenidas mediante ensayos físicos de explosiones sobre tanques en modelos de escala reducida. Las mediciones y cálculos basados en ellas permiten identificar no solo distribuciones de presiones alrededor de la circunferencia, sino también diferencias en tiempo de arribo de la onda,  $TOA$ , dependiendo de la ubicación de cada punto en la circunferencia. Los análisis estáticos sirven de referencia al problema, pero no pueden emplearse para hacer estimaciones de la capacidad resistente de los tanques ante explosiones, como imaginaba [Atkinson \(2011\)](#).

Los resultados dinámicos para cargas impulsivas muy breves debidas a explosiones muestran una oscilación de la cáscara alrededor de la posición descargada, alcanzándose un máximo en los instantes iniciales. Para casos como este no es evidente visualizar la aplicación de un criterio de estabilidad dinámico, tal como existe el criterio de Budiansky para cargas escalón. Para limitar las oscilaciones de la cáscara, se ha empleado el criterio de Simites, que toma como referencia el desplazamiento estático crítico y supone que se llega a inestabilidad cuando los desplazamientos dinámicos alcanzan los estáticos críticos.

Usando este criterio, se encuentra que las cargas límite dinámicas bajo impulso debido a una explosión son mayores a las estáticas, y la diferencia aumenta significativamente a medida que el tiempo de duración de la presión disminuye.

Por otro lado se ha observado, para el caso de estudio, que para pequeños desplazamientos la influencia del  $TOA$  no es significativa; las diferencias se acentúan a medida que aumentan los desplazamientos.

Las investigaciones informadas en este trabajo sobre cáscaras cilíndricas sometidas a efectos explosivos se encuentran en una primera etapa de desarrollo. Los antecedentes referentes a la modelación de cargas y el comportamiento estructural son escasos y en determinados temas inexistentes. Los autores consideran que las temáticas más relevantes para investigaciones futuras abarcan:

- ❖ Análisis tendientes a cuantificar el comportamiento considerando las distintas duraciones del pulso según la coordenada circunferencial.
- ❖ Análisis estructurales considerando la incidencia de la velocidad de deformación del material (en inglés, *strain rate*).
- ❖ La incorporación en los estudios de distintas relaciones D/h y D/L.
- ❖ La incorporación en los análisis de tanques con techo y sus distintas tipologías.
- ❖ Desarrollo de propuestas de criterios límite.
- ❖ La introducción de imperfecciones dentro del marco de la problemática.
- ❖ El desarrollo de criterios de diseño que puedan ser reunidos en especificaciones de uso general.

**Agradecimientos.** Esta investigación ha sido apoyada por subsidios de SECyT-UNC y de CONICET. El segundo autor es Investigador Superior de CONICET.

## REFERENCIAS

- Ameijeiras, M. P., Godoy L. A., Respuesta no lineal de tanques de almacenamiento de petróleo frente a cargas debidas a explosiones, *AMCA, Mecánica Computacional*, 22: 3323-3340, 2013.
- Atkinson, G., Blast damage to storage tanks and steel clad buildings, *Process Safety and Environmental Protection*, 89: 382-390, 2011.
- Batista-Abreu, J., 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.
- Budiansky B., Dynamic buckling of elastic structures: Criteria and Estimates, in: *Dynamic Stability of Structures*, 83-106, (Ed. G. Herrmann), Pergamon Press, 1967.
- Buncefield Major Incident Investigation Board, The Buncefield Incident, 11 December 2005, The final report of the Major Incident Investigation Board. v.11, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom, 2008.
- 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., Yalams, 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.
- Gao, Y., Hoo Fatt, M. X., Dynamic pulse buckling of single curvature composite shells under external blast, *Thin-Walled Structures*, 52: 149-157, 2012.
- Glasstone, S., Dolan P. J., The effects of nuclear weapons, 3rd. Edition, US Department of Energy: Washington, D.C., 1977.
- Kowal-Michalska, K., Kubiak, T., Swiniarski, J., Influence of blast pressure modeling on the dynamic response of conical and hemispherical shells, *Thin-Walled Structures*, 49: 604-610, 2011.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J., Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Special Issue: Loading on

- Structures, 76-91, 2007.
- Noret E., Prod'homme G., Yalamas T., Reimeringer M., Hanus J. L., D.-H. Duongb D. H., Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (9): 998–1022, 2012.
- Riks E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *Int. J. of Solids and Structures*, 15: 529-551, 1979.
- Simitses, G. J., *Dynamic Stability of Suddenly Loaded Structures*, Springer-Verlag New York Inc., 1990.
- Snay, H. G., *The scaling of underwater explosion phenomena*, United States Naval Ordnance Laboratory 61-46, 1961.
- Taveau, J., Explosion of fixed roof atmospheric storage tanks, Part 1: Background and review of case histories, *Process Safety Progress*, 30 (4): 381-392, 2011.
- UFC 3-340-02, *Structures to resist the effects of accidental explosions*, Unified Facilities Criteria, US Department of Defense, 2008.
- Virella, J. C., Godoy, L. A., Suárez, L. E., Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation, *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (6): 521:531, 2006.
- Weggel, D., Whelan M. J., Rigid tank blast testing summary and procedures for estimating blast overpressure distribution on a cylindrical tank surface, Technical Report, Infrastructure Security and Emergency Responder Research and Training (ISERRT) Facility, Department of Civil and Environmental Engineering, UNC Charlotte, NC, USA, 2013.