

RESPUESTA NO LINEAL DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO FRENTE A CARGAS DEBIDAS A EXPLOSIONES

Mariano P. Ameijeiras^a y Luis A. Godoy^b

^a Universidad Nacional de Córdoba, FCEfyN, Córdoba, Argentina, m.ameijeiras@gmail.com

^b Universidad Nacional de Córdoba, FCEfyN, Córdoba y CONICET, Argentina,
luis.godoy@gmail.com

Palabras clave: Cargas de pandeo; Explosiones; Presiones debidas a explosiones; Pandeo dinámico; Tanques cilíndricos

Resumen. En este trabajo se estudian los efectos debidos a explosiones sobre tanques de almacenamiento de petróleo usando modelación computacional. El trabajo abarca el análisis estructural del tanque y la implementación de una metodología para construir impulsos simplificados triangulares y de duración e intensidad variable según la coordenada meridional del tanque, basados en 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. Las mediciones han permitido establecer un mapa de acciones con su correspondiente variación en el tiempo, de manera de poder trabajar en forma secuencial sobre la respuesta de la estructura bajo estos estados de presiones dinámicas. El análisis estructural consiste inicialmente en determinaciones del comportamiento no lineal estático con presiones equivalentes (igual distribución a las obtenidas por ensayos pero aplicadas estáticamente). Luego se realizan análisis de bifurcación a partir de una trayectoria fundamental lineal (LBA), análisis estáticos no lineales de seguimiento de la trayectoria de equilibrio (Riks) y finalmente, se evalúan los resultados anteriores frente a la respuesta dinámica no lineal bajo cargas escalón y de pulso explosivo con métodos numéricos implícitos y amortiguamiento de Rayleigh. El criterio de pandeo dinámico usado es el desarrollado originalmente por Budiansky y Roth. Debido a que se encuentran diferencias significativas con respecto a otros casos de carga bajo acciones dinámicas no lineales, se hacen modelaciones que varían la duración de la carga aplicada, yendo desde una carga escalón hasta cargas triangulares de tiempos de duración decrecientes hasta el orden de duración de los pulsos explosivos. Los resultados indican que hay tres regiones de respuesta de acuerdo a la duración de la carga, variando desde problemas dominados por inestabilidad tipo Budiansky-Roth hasta problemas controlados por el impulso aplicado.

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 o granjas de almacenamiento de combustible. Los orígenes de tales explosiones pueden provenir de causas diversas, incluyendo accidentes operativos, fuego y acción intencional de sabotaje. Después de la ocurrencia de uno de estos accidentes hay múltiples procesos de litigio por sumas que exceden largamente el valor de la infraestructura afectada, en los que se busca identificar responsabilidades en el evento. Esas investigaciones deberían basarse en un conocimiento profundo de la mecánica del comportamiento estructural de este tipo de cáscaras frente a presiones súbitas, el cual no está disponible en la actualidad.

Un caso emblemático ha sido el accidente de Buncefield, Inglaterra, ocurrido en 2005 ([Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008](#)), en el que la explosión se debió a una nube de vapor y afectó tanto construcciones vecinas como tanques de la misma granja. Los estudios de daño debidos a la explosión son de tipo cualitativo, indicando mecanismos creíbles de daño a partir de niveles de presión y tiempos estimados ([Atkinson, 2011](#)). Este tipo de explosión se debe a deflagración, en la que la explosión de una nube de vapor ocurre de manera no confinada, como opuesto a problemas de explosiones confinadas, que se denominan detonación y son propias de explosivos. La velocidad de propagación de la onda es más rápida en detonaciones (tiempos de sobrepresión del orden de decenas de milisegundos) que en deflagraciones (cientos de milisegundos).

El mayor esfuerzo por comprender problemas de explosiones en tanques de almacenamiento de productos combustibles ha sido realizado recientemente en Francia. Esto llevó a identificar tanques típicos que permitan cubrir rangos de interés práctico, sobre los cuales se llevan a cabo descripciones de explosiones y respuesta estructural. El objetivo es establecer análisis probabilístico de valores umbrales causantes de distintos niveles de daño ([Noret et al., 2012](#)). Para este esfuerzo se emplean técnicas que simplifican grandemente el problema. Se reportan experimentos de explosiones sobre un modelo de tanque instrumentado (con un factor de escala geométrico de 1:48) para registrar valores de sobrepresiones y tiempos de actuación ([Duong et al., 2012a](#)). Finalmente se realizaron análisis simplificados usando soluciones analíticas de las ecuaciones de cáscaras de [Donnell \(1976\)](#). El criterio de pandeo dinámico de estos autores consiste en limitar los desplazamientos cuando el material incursiona en rango plástico ([Duong et al., 2012b](#)).

En este artículo se analiza la respuesta estructural de un tanque cilíndrico tomado como estudio de caso, que recibe cargas debidas a ondas provenientes de explosiones. La distribución espacial de la sobrepresión ejercida por el frente de ondas sobre la cáscara cilíndrica no es motivo de la presente investigación y surge de ensayos realizados por otros autores.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Un primer tipo de empleo de la dinámica en problemas de estabilidad estructural es el Criterio Dinámico de Estabilidad para sistemas sometidos a carga esencialmente estática. Tal criterio está discutido, por ejemplo, en [Croll y Walker \(1972\)](#): para una carga estática definida se investiga la estabilidad del estado en equilibrio mediante el agregado de una perturbación en la forma de una vibración de amplitud pequeña, y se mide la respuesta en el tiempo. Cuando el sistema es estable, se producen oscilaciones alrededor del estado estático de equilibrio, que tienden a desaparecer si se incluye amortiguamiento; el sistema es inestable si la respuesta diverge en el tiempo. Otra medida adecuada de un estado inestable es si al menos

una frecuencia de vibración es imaginaria. Este criterio no está orientado a identificar pandeo dinámico sino a verificar la estabilidad de un estado en equilibrio bajo carga estática.

La problemática del pandeo de cáscaras bajo cargas dinámicas es un tema complejo que aún se encuentra en discusión. Budiansky (Budiansky, 1967; Budiansky y Roth, 1962), propuso un criterio de pandeo dinámico en la década de 1960, basado en la respuesta dinámica no lineal (cinemática) de la cáscara. En este caso se define como carga de pandeo dinámico aquella para la cual un pequeño incremento en el valor de la carga produce un cambio no proporcional en la respuesta, medida en términos de desplazamientos. Este criterio es cualitativo y requiere computar la respuesta en el tiempo un número considerable de veces para identificar el cambio mencionado. Ejemplos de aplicación del criterio se encuentra en numerosas referencias (ver, por ejemplo, Tanov y Tabiei, 1998; Chamis, 2010). El criterio de Budiansky, se ha empleado en el análisis de tanques bajo presiones de viento, en cuyo caso suponen ráfagas de duración breve (alrededor de 3s), como pulsos rectangulares (Flores y Godoy, 1999), como carga escalón (Flores y Godoy 1998), o como fluctuaciones alrededor de un impulso rectangular (Sosa y Godoy, 2005). También se ha usado el criterio para predecir inestabilidad bajo acciones sísmicas, en cuyo caso ocurren procesos de carga y descarga (Virella et al., 2006).

Kleiber et al. (1987), critican el criterio de Budiansky-Roth porque no ofrece una determinación de estabilidad precisa, no contempla la posible existencia de bifurcaciones, y no considera la sensibilidad frente a imperfecciones. Esto último no es una limitación del criterio, sino del costo, dado que pueden llevarse a cabo estudios dinámicos no lineales considerando imperfecciones de diferente amplitud. También critican la forma en que se ha implementado el criterio en las décadas anteriores, porque se desprecian términos inerciales en la trayectoria pre-crítica, se simplifican términos no lineales cinemáticos (como en las ecuaciones de Donnell), o se supone que los modos de pandeo estático y dinámico son coincidentes. Sin embargo, esas limitaciones eran propias de programas para propósitos específicos en ambientes de limitada capacidad de cómputo, situación típica de análisis anteriores al 2000.

Otros autores propusieron otros criterios desde la década de 1980 (Kleiber et al., 1987; Burmeister y Ramm, 1990; Gantes et al., 2001), orientados principalmente a reducir la necesidad de cálculo; sin embargo, tales enfoques conducen a aproximaciones que en muchos casos no se justifican en la actualidad, en que la capacidad de cómputo ha crecido exponencialmente.

El punto de partida básico en todas las investigaciones sobre pandeo dinámico es la respuesta dinámica no lineal junto con el criterio de Budiansky-Roth. Burmeister y Ramm (1990) intentaron reducir el número de análisis dinámico no lineal (para carga escalón) mediante la solución conjunta con un problema de autovalores. El procedimiento fue denominado "Método de Escalado", en el que se resuelve la historia en el tiempo, y para un tiempo determinado (bajo un nivel definido de carga) se verifica la estabilidad mediante la generación de un estado perturbado vecino. Esto lleva a verificar estabilidad mediante un problema de autovalores del tipo:

$$(K_T - \omega^2 M)\varphi = 0 \quad (1)$$

donde K_T es la matriz de rigidez tangente. Ocurre un estado crítico cuando la frecuencia menor se anula. Alternativamente, se emplea un multiplicador λ de carga, resolviéndose el sistema

$$(K_T - \lambda K_G)\varphi = 0 \quad (2)$$

siendo K_G la matriz de carga-geometría. Se llega a pandeo dinámico cuando el menor valor

del multiplicador es $\lambda=1$. Esta linealización del problema tiene sentido en la vecindad del estado crítico y pierde precisión si λ es grande, en cuyo caso puede ser necesario redefinir la carga y volver a comenzar el análisis dinámico no lineal. Los autores recomiendan comenzar con un estado de carga del orden del 70% de la carga crítica estática.

Kroplin y Dinkler (1986) investigaron el uso de métodos estáticos y dinámicos para estudiar el pandeo de cáscaras, bajo el argumento que el pandeo es un proceso dinámico aunque la carga sea estática, debido a que el sistema salta a una configuración de equilibrio que puede no ser vecina a la considerada (en *snap-through* o en bifurcación inestable). La pregunta es si análisis estáticos y dinámicos conducen a iguales cargas y modos de pandeo. Las cargas consideradas son tipo escalón, y llevan a cabo el seguimiento de la historia en el tiempo, agregando medidas de acompañamiento que toman de Ramm. Básicamente agregan la condición crítica mediante un problema de autovalores con la matriz de rigidez tangente (que debe evaluarse del problema estático). Los autores buscan la intersección entre la curva transitoria y la de autovalores; a partir de esa intersección la frecuencia se anula, lo que induciría un movimiento de cuerpo rígido si se producen perturbaciones. La conclusión es que los análisis estáticos y dinámicos en cáscaras proveen resultados que no son coincidentes, con diferencia en cargas y modos.

Kleiber et al. (1987) explora la idea que puede haber soluciones en la respuesta no lineal dinámica que se bifurcan de la trayectoria principal, lo cual denomina “cuasi-bifurcaciones”. Bajo carga escalón, siguiendo una historia de carga determinada, si se detiene en un tiempo determinado y se produce una pequeña oscilación que perturba la solución, la respuesta se aparta en forma monótonica cuando ocurre una cuasi-bifurcación. En otras palabras, es la aplicación del criterio dinámico de estabilidad a un estado congelado en el tiempo. Este es el mismo concepto explorado por Ramm.

Kounadis et al. (1989), resolvieron analíticamente un problema de un grado de libertad de forma estática y dinámica: es un “arco” tri-articulado, formado por dos barras rígidas articuladas entre sí y con un resorte horizontal en un apoyo. Supusieron que la carga cae súbitamente sobre el centro del arco, y se mantiene adherido al mismo sin separarse. La identificación de inestabilidad dinámica se hace en el espacio de fase. Los autores ilustran que la carga para la que se produce un máximo en la curva de energía potencial nula es la de inestabilidad dinámica. Esto se puede visualizar en un diagrama carga-respuesta, en el que la intersección de la curva estática (trayectoria de equilibrio) y la dinámica se cruzan en el máximo de esta última, en el estado que es la carga de pandeo dinámica. La dificultad de este criterio es su generalización a sistemas de múltiples grados de libertad, que permita computar la condición de energía potencial nula requerida.

El criterio de Budiansky resulta claramente aplicable para cargas tipo escalón y para pulsos de duración del orden de $3s$ o más, pero presenta dificultades cuando ocurren procesos de carga y descarga, como acciones sísmicas. En esos casos se ha propuesto investigar las condiciones para las que ocurre un cambio significativo en la rigidez de la estructura, para lo cual se define lo que se llama una pseudo-trayectoria de equilibrio (Virella et al., 2006; Buratti y Tavano, 2013). La experiencia actual es muy limitada para el caso de análisis de cargas impulsivas de duración muy breve (fracción del segundo). Este trabajo muestra los desafíos que se enfrentan en esas situaciones y ofrece alternativas para realizar evaluaciones de estados de pandeo dinámico.

3 PRESIONES DEBIDAS A ONDAS EXPLOSIVAS

3.1 Fenomenología de las ondas debidas a explosiones

La detonación es una reacción química de alta velocidad que produce una liberación

repentina y localizada de energía que se disipa violentamente en ondas de choque. Estas ondas son regiones de aire altamente comprimido y se irradian de forma esférica desde el foco del evento. La zona de aire comprimido crea una sobrepresión (presión de aire en exceso a la ambiental) y una presión dinámica resultante del flujo de aire (Glasstone y Dolan, 1977).

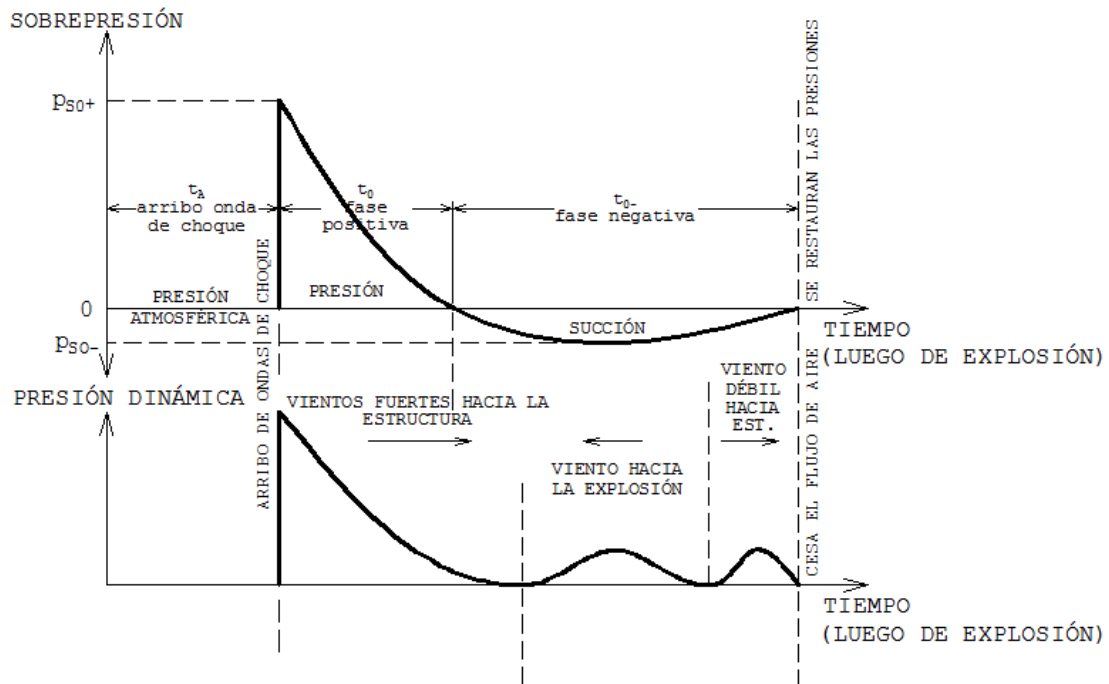


Figura 1: Variación de la sobrepresión y presión dinámica con el tiempo

En la Figura 1 se muestran típicas variaciones de la evolución de sobrepresiones y las presiones dinámicas en un punto cualquiera alejado una determinada distancia de la explosión. Cuando arriba la onda de presión a un punto dado de la estructura, la sobrepresión crece casi instantáneamente a su pico (P_{SO+}) para luego decrecer hasta cero, momento en el cual ocurre una pequeña sobrepresión negativa (succión, P_{SO-}). La presión dinámica también se incrementa casi instantáneamente cuando arriba la onda de choque y consiste en un viento fuerte que se aleja del foco de la explosión, luego un viento débil hacia la explosión y posteriormente un viento suave que se vuelve a alejar del foco. La sobrepresión es, en forma aproximada, una función inversamente proporcional del cubo de la distancia (Ngo et al., 2007; AASHTO, 2010; entre otros).

La historia de sobrepresiones en el tiempo, excepto a muy cortas distancias de la explosión, tienen la misma forma (Figura 1) pero con valores diferentes que definen las curvas y dependientes básicamente de la magnitud de la explosión y la distancia desde el evento al punto de interés (*stand-off distance*). Por ejemplo, la presión de pico, P_{SO+} , disminuye significativamente con la distancia mientras que la duración de la fase positiva, t_0 , incrementa.

La duración de la fase positiva del impulso (t_0) es variable. Ejemplificando: una masa de 250kg de trinitrotolueno (TNT) a una distancia de 75m produce una presión P_{SO+} del orden de 12kPa con una duración de fase positiva, t_0 , del orden de 32ms. Las velocidades de las deformaciones específicas (*strain rate*) que se producen en la estructura son muy elevadas (del orden de $10^2 s^{-1}$ a $10^4 s^{-1}$) e influyen en las relaciones constitutivas del material.

La literatura presenta varios modelos y métodos para predecir las sobrepresiones y sus efectos como función de la distancia y la carga al origen del evento (Baker et al., 1977; Taveau, 2012; UFC 3-340-02, 2008; entre otros). Cuando la onda de choque encuentra un

obstáculo perpendicular a su dirección de propagación, la reflexión incrementa la sobrepresión a un valor máximo P_r (presión reflejada).

Un conjunto de curvas típicas para la determinación de sobrepresiones debidas a explosiones es la mostrada en la Figura 2 donde, en función de la distancia foco-objetivo, R , y la masa de material explosivo, W , expresada en unidades equivalentes de TNT, se obtienen las sobrepresiones, P_r y P_{so} , los impulsos, i_r e i_s , los tiempos de arribo de onda y la duración de fase positiva, t_A y t_0 , la velocidad de onda, U , y longitud de onda de fase positiva, L_w (UFC 3-340-02, 2008).

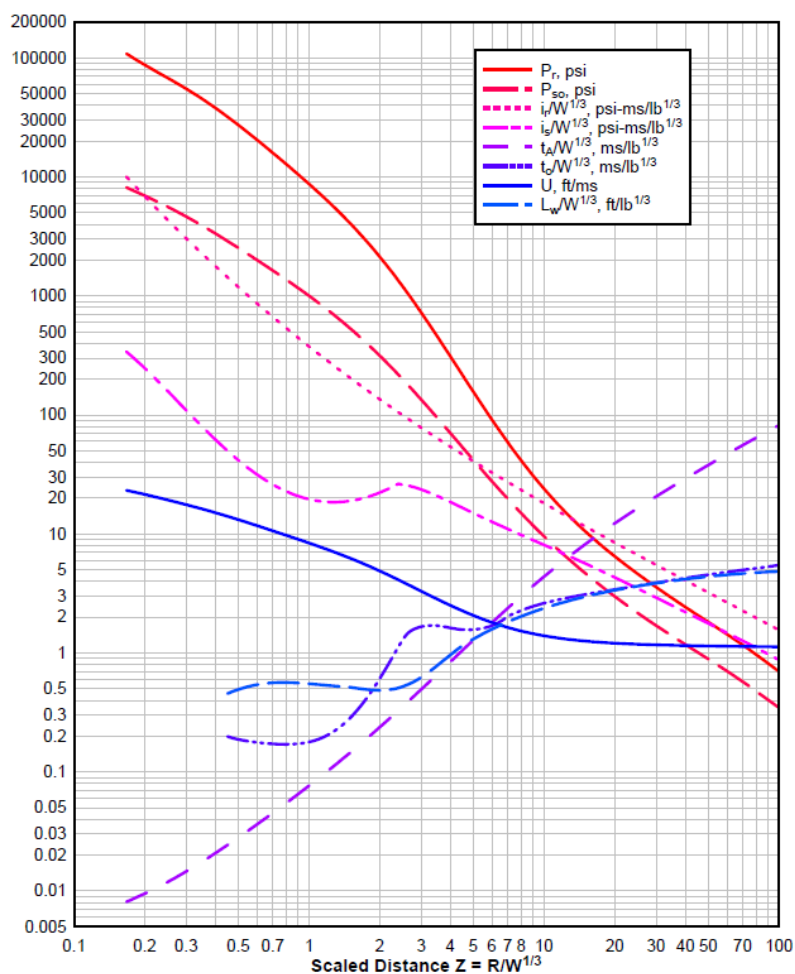


Figura 2: Parámetros de onda de choque explosiva a nivel del mar. Carga esférica de TNT en la superficie (UFC 3-340-02, 2008)

3.2 Determinación de sobrepresiones por ensayos

Existe un número muy reducido de experiencias de explosiones sobre estructuras de tanques. La más reciente es la de un grupo de investigadores en Francia (Noret et al., 2012; Duong et al., 2012a; Duong et al., 2012b). En este trabajo se adoptan valores experimentales medidos por investigadores de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, UNNC (Weggel, 2012). El ensayo se realizó sobre un tanque cilíndrico de acero estructural de 3.0ft de diámetro, 2.4ft de altura y 3/8in de espesor. Se colocó la carga a 6ft desde el punto más cercano del tanque. Se colocaron 57 agujeros roscados que recibieron los sensores de presión.

Los resultados experimentales sobre modelos de paredes rígidas permiten obtener la distribución de presiones en el sentido de la circunferencia del tanque, y la variación de esa

presión en el tiempo.

La distribución espacial de sobrepresiones obtenida en los ensayos, a la que se le dio continuidad y ajuste mediante una serie de Fourier y normalizó respecto de la presión máxima responde a la serie:

$$p_r(\theta) = \sum_{i=0}^8 c_i * \cos(i * \omega * \theta) \quad (3)$$

donde $\omega = 0.019912$ y los coeficientes de sobrepresión pueden extraerse de la [Tabla 1](#).

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

Por otro lado, la distribución espacial normalizada de impulsos reflejados puede obtenerse de la serie (4), cuya forma se ajusta a los resultados obtenidos en los ensayos.

$$i_r(\theta) = \sum_{i=0}^4 c_i * \cos(i * \omega * \theta) \quad (4)$$

donde $\omega = 0.017085$ y los coeficientes de la expresión (4) pueden extraerse de la [Tabla 2](#).

c_0	0.346860
c_1	0.398780
c_2	0.132580
c_3	0.101020
c_4	0.020764

Tabla 2: Coeficientes de Fourier para impulsos normalizados

En la [Figura 3](#) se muestra la descripción de algunos de los parámetros referidos a la geometría del tanque a utilizar durante este trabajo; en tanto que en la [Figura 4](#) se muestra la idealización de la curva $p_r=f(t)$, que se utilizará para la modelos computacionales que se describen más adelante ([Gao y Hoo Fatt, 2012](#); [Kowal-Michalska et al., 2011](#); [Ngo et al., 2007](#), entre otros).

Es necesario mencionar que los gradientes de presiones e impulsos en la altura resultan despreciables. Esta conclusión será válida en tanto $R > 2L$.

3.3 Procedimiento para el uso de curvas experimentales

El siguiente procedimiento establece una forma de operar para obtener las distribuciones espaciales de presiones reflejadas y los tiempos de duración alrededor de la cáscara cilíndrica.

1. Determinar la carga de explosivo, W , y la distancia foco/objetivo $R (> 2L)$.
2. Calcular la distancia escalada $Z=R/W^{1/3}$.
3. Utilizar la [Figura 2](#), para determinar p_r e i_r en $\theta=0^\circ$.
4. Utilizar la expresión (3) y la expresión (4) para determinar la distribución espacial de la

presión y el impulso, con lo cual quedará determinado en forma continua la función presión, $p_r(\theta)$, e impulso, $i_r(\theta)$. Esto se logra multiplicando los valores determinados en el paso 3, por las ordenadas respectivas de las curvas mencionadas.

5. Asumir una distribución de presiones uniforme en altura.

6. Determinar un tiempo idealizado de duración de la carga a través de la expresión $T_0 = 2i_r/p_r$.

7. Habiendo realizado los pasos anteriores, quedará definida la historia de cargas idealizada triángulo $p_r = f(\theta, t)$ para cada punto de la cáscara cilíndrica.

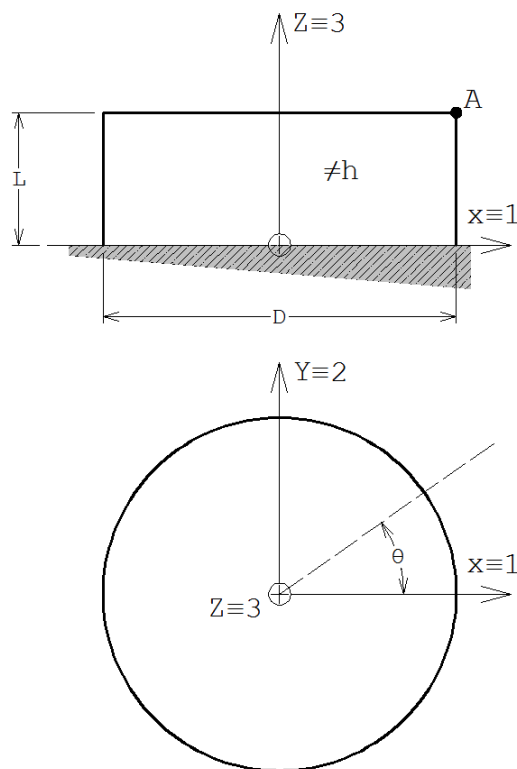


Figura 3: Definición de parámetros geométricos del modelo

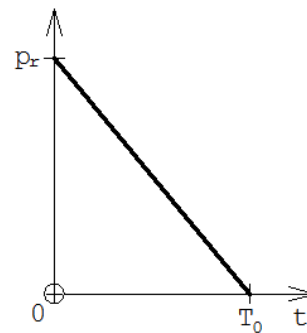


Figura 4: Modelo adoptado de sobrepresión reflejada sobre la estructura

4 ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE EFECTOS DE EXPLOSIONES SOBRE UN TANQUE TIPO

4.1 Modelo

En lo sucesivo se analiza un tanque cilíndrico de pared delgada y espesor uniforme con las características geométricas y mecánicas indicadas en la [Tabla 3](#).

Diámetro [D]	Altura [L]	Espesor [h]	D/L	D/h	Mód. el. long. [E]	Coef. de Poisson [ν]	Dens. [ρ]	Tensión de fluencia [σ _y]
33.2500	8.3125	0.0095	4	3500	200000*10 ⁶	0.3	7850.	250*10 ⁶

Tabla 3: Propiedades geométricas y mecánicas del tanque analizado

El tanque se modela estando vacío, abierto en su parte superior (sin techo fijo), de geometría sin imperfecciones y considerando la distribución espacial de presiones según se ha indicado en la expresión (3), con el valor máximo ubicado en $\theta=0^\circ$ es decir, el frente de ondas viene desde +X.

Para esta primera etapa, se ha supuesto que los tiempos de duración de la carga, T_0 , son iguales en todos los puntos de la cáscara. Para análisis más refinados se puede tomar en cuenta la demora en llegar las presiones a cada punto en sentido de la circunferencia.

Se modela el tanque por 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. La función de fluencia y de potencial plástico, responde al criterio de von Mises bajo la suposición de plasticidad perfecta.

4.2 Estudios numéricos realizados y resultados

A continuación se describen las tipologías de análisis llevados a cabo:

1. Análisis estático no lineal (GMNA-S);
2. Análisis de pandeo por bifurcación a partir de una trayectoria fundamental linealizada, resolviendo un problema de autovalores (LBA);
3. Análisis estático no lineal de la trayectoria de equilibrio (GMNA-Riks);
4. Análisis dinámico implícito, con amortiguamiento de Rayleigh ($\alpha=0.41$, $\beta=9.6*10^{-4}s$) para una carga escalón (GMNA-D1);
5. Análisis dinámico implícito, con amortiguamiento de Rayleigh ($\alpha=0.41$, $\beta=9.6*10^{-4}s$) para funciones de carga-tiempo del tipo explosivas (Figura 4) con las siguientes duraciones, T_0 , del pulso: $1.s$, $0.5s$, $0.25s$, $0.125s$, $0.0625s$, $0.03125s$, $0.015625s$ (GMNA-D2).

Si bien los modelos realizados permiten comportamientos de material tanto elásticos como plásticos, los últimos son alcanzados, para este caso de estudio, sólo para muy grandes desplazamientos poscríticos, por lo que no se hará ninguna otra consideración en lo que resta de este trabajo.

En primer lugar, se ha determinado la trayectoria fundamental de equilibrio del sistema considerado como estático, empleando un algoritmo de avance sobre trayectoria no lineal en el que se controla la carga. La distribución de presiones es la correspondiente a los ensayos reportados arriba, pero aplicadas de forma estática. Los resultados del análisis, identificado como GMNA-S, puede observarse en la Figura 5 en términos de la presión actuante en el punto A (denominada p_{rA}) versus el desplazamiento en el punto A ($\theta=0^\circ$, $z=L$), designado como U_{IA} . Se produce un comportamiento no lineal no rígido, en el que el sistema pierde rigidez con la carga creciente.

En segundo lugar se investiga el estado de bifurcación del equilibrio sobre la trayectoria fundamental, pero en lugar de evaluar sobre la trayectoria no lineal que se muestra en la Figura 5, se supone una trayectoria fundamental linealizada. Los resultados de este análisis, identificado como LBA, permiten evaluar la presión crítica y el modo de deformación en el que se deforma la cáscara al bifurcar fuera de la trayectoria fundamental. El multiplicador obtenido, que representa el valor más bajo de carga de pandeo estático elástico es $\lambda_c=2147.1$ y que representa la presión necesaria pico reflejada en el punto A, que con una distribución como la representada por los ensayos de carga explosiva, lleva a la estructura a un estado de bifurcación. El multiplicador es un valor adimensional. El modo asociado a la carga crítica puede observarse en la Figura 6, esa es la configuración deformada del modo de menor carga que resuelve el problema de autovalores LBA.

En tercer lugar se ha investigado la trayectoria de equilibrio empleando un análisis no lineal en el que el parámetro de avance no sea la carga misma, sino alguna medida que

permita tanto incrementos como disminuciones en la carga. El algoritmo empleado es el conocido como algoritmo Riks. Para el modelo GMNA-Riks, en la Figura 7, puede observarse la trayectoria no lineal de equilibrio expresada a través del desplazamiento del punto A. En esta trayectoria, el valor de la presión máxima determinada es $\lambda_{st}=2038.7$, que se alcanza para un desplazamiento $U_{IA}=-0.026$. Este valor máximo es un 5% menor que el de bifurcación. La Figura 8 muestra la configuración deformada que se alcanza cuando el punto A se desplaza hasta U_{IA} .

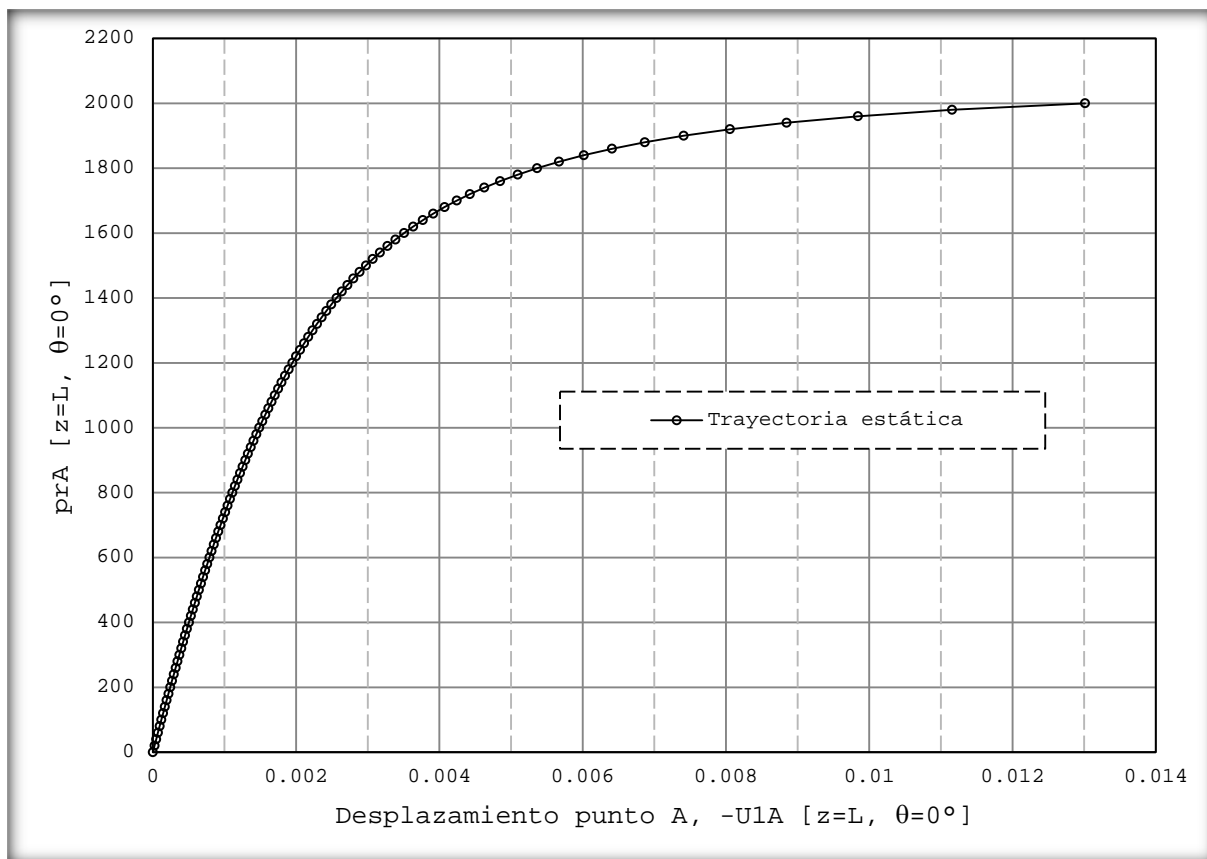


Figura 5: Análisis estático no lineal. Presión versus desplazamiento en el punto A (ver Figura 3)

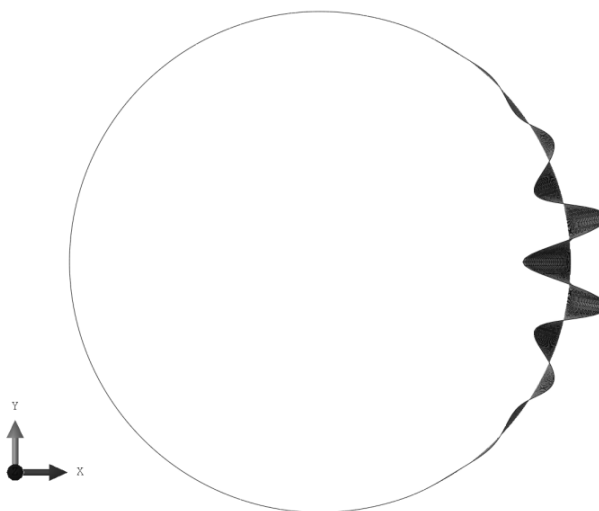


Figura 6: Deformada del primer modo. Análisis LBA ($\lambda_c=2147.1$)

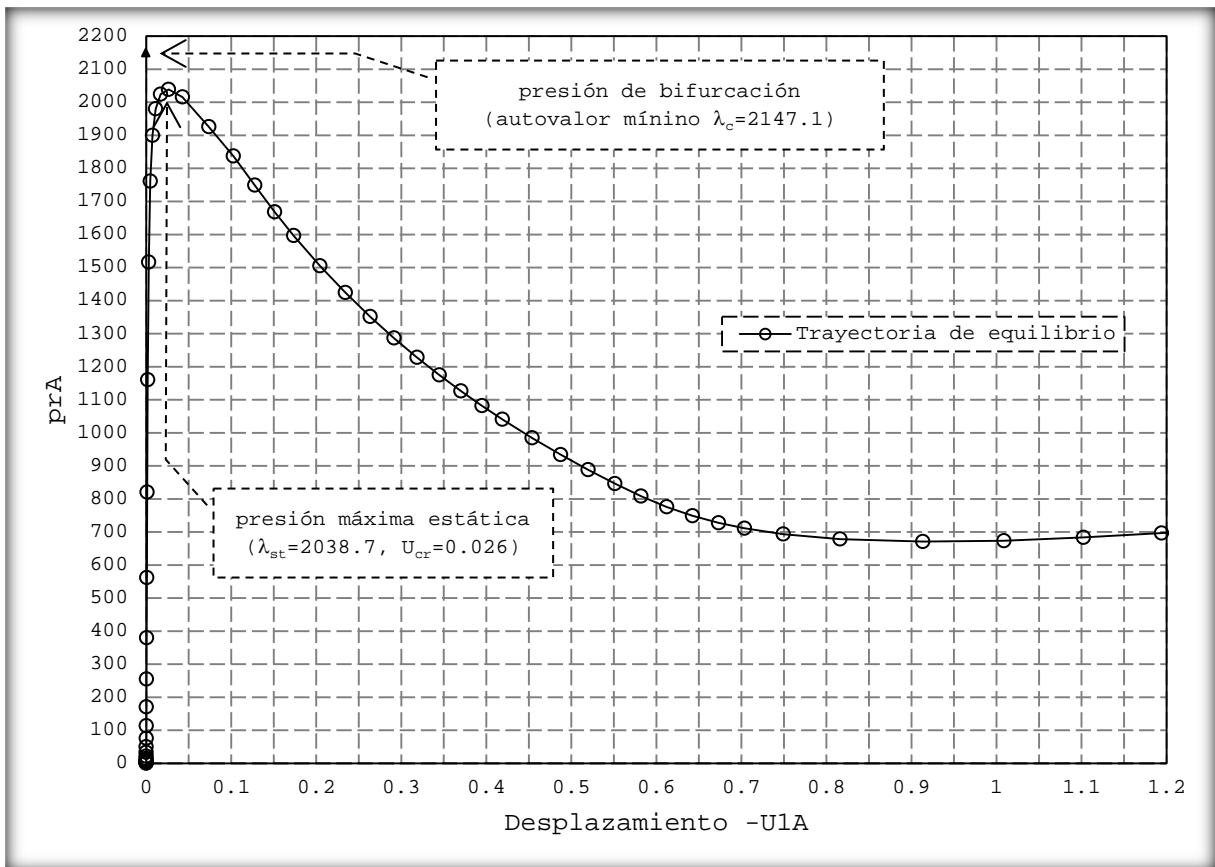


Figura 7: Trayectoria de equilibrio para el punto A identificado en la Figura 3

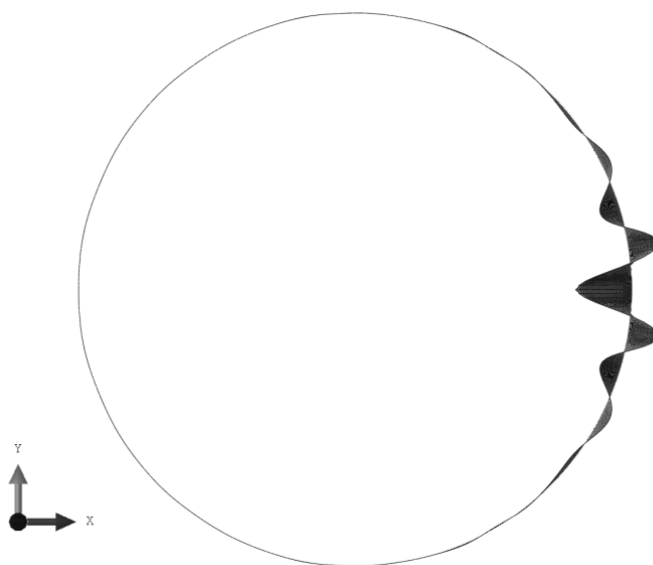


Figura 8: Configuración deformada GNLA-Riks con desplazamiento radial en el punto A, $U1A=0.026$

Los primeros tres análisis dan una idea del comportamiento estático de la cáscara bajo las presiones debidas a una explosión pero aplicadas de manera estática gradual. Sin embargo, no reflejan la naturaleza impulsiva de la carga, que se aplica en un tiempo de fracciones de segundo.

Debido a la naturaleza impulsiva de las cargas producidas por una explosión, lo cual dificulta apreciar el comportamiento que se obtiene, se comienza considerando una carga dinámica pero de tipo escalón (*Heaviside*), que se sabe debería dar resultados no demasiado diferentes del estático. Este análisis se denominó GMNA-D1. Aquí se analizó la respuesta dinámica durante un tiempo total de $6s$ (que es aproximadamente 20 veces el período natural mínimo, calculado como $T_n=0.30s$). De acuerdo al criterio de pandeo dinámico de Budiansky-Roth, se obtuvieron respuestas en el tiempo de los desplazamientos para el punto A, calculadas sucesivamente para diferentes valores de presión máxima. Los resultados de las curvas $U_{IA}(t)$, para distintos valores de carga p_{rA} se muestran en la Figura 9. Para valores bajos de carga, por ejemplo, entre $0.5\lambda_{st}$ y $0.9\lambda_{st}$, se tienen respuestas oscilatorias alrededor de una posición de equilibrio. Esto refleja estados estables de respuesta dinámica. Para valores altos de carga, como $0.9975\lambda_{st}$, ya la respuesta se ha disparado fuera del estado de equilibrio, de manera que estamos en presencia de un estado inestable. Mediante un procedimiento iterativo se ha evaluado el valor mínimo de carga para el cual el sistema diverge de las oscilaciones alrededor de un estado, en este caso para $0.9950\lambda_{st}$.

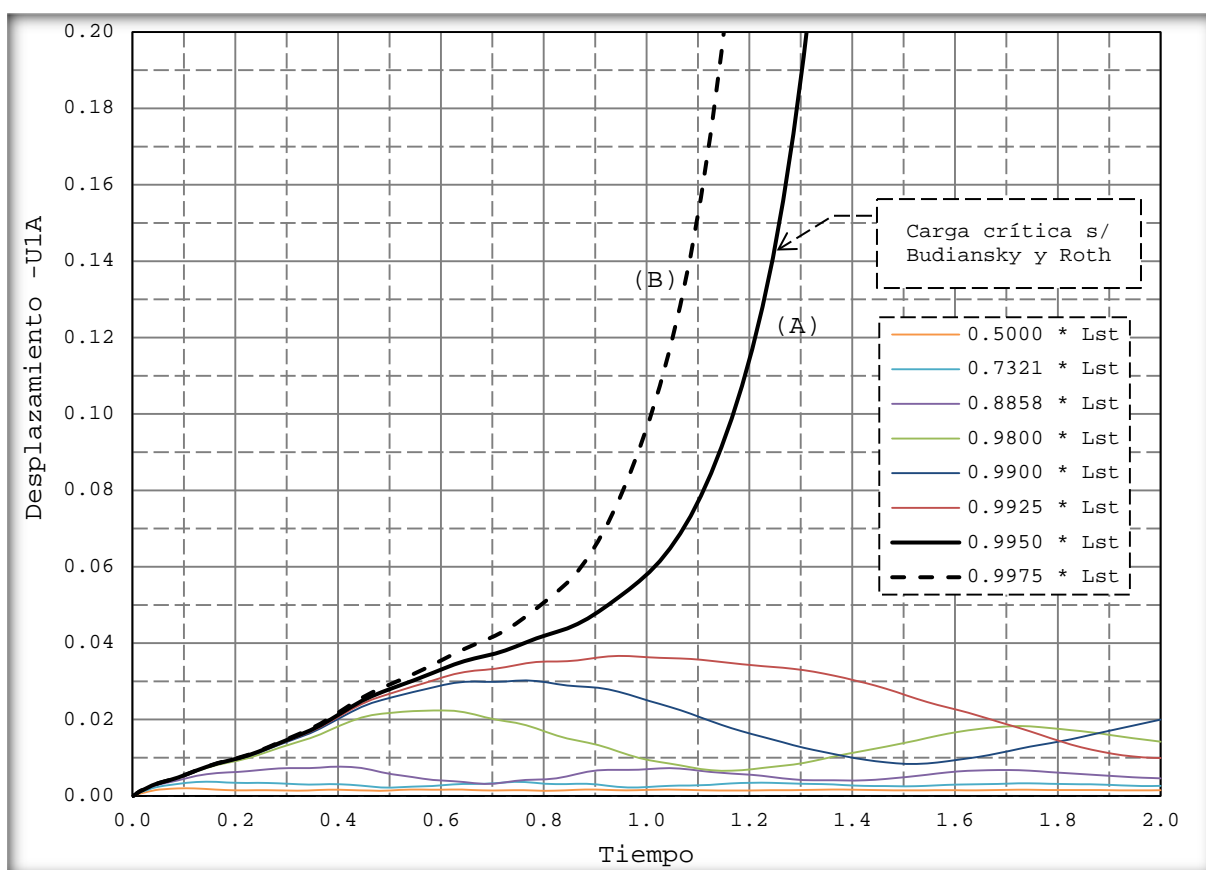


Figura 9: Análisis para carga escalón considerando la distribución de presiones debidas a una explosión determinadas según la expresión (3) (GMNA-D1)

El paso siguiente es trabajar con cargas con variación lineal en el tiempo (triangular decreciente, Figura 4), cuya duración está dada por T_0 . El análisis dinámico no lineal se

denomina aquí GMNA-D2. De manera similar al problema de carga escalón, se obtuvo la respuesta en el tiempo, pero en este caso para varios T_0 dados, por lo que el número de análisis ha aumentado significativamente. Por razones de espacio no se presentan ya las respuestas en el tiempo, sino los valores de desplazamiento máximo en el punto A, para distintos valores de carga aplicada y tiempos de duración de la presión.

Los resultados de todos estos análisis se han representado en la Figura 10 (para duraciones entre $1s$ y $0.125s$) y en la Figura 11 (para duraciones entre $0.0625s$ y $0.015625s$), en términos de las respuestas máximas para cargas crecientes del pulso explosivo (p_{rA}) para cada duración del pulso propuesta (T_0). De esta forma, cada punto de cada curva representa un análisis diferente $p_{rA}-T_0$ del que se extrajo el desplazamiento máximo U_{IA} . En la misma Figura 10 se reproduce el análisis de carga escalón como referencia, en el que para la carga de pandeo dinámico aumenta el desplazamiento sin incremento de carga. Tal comportamiento se verifica también para $1s$ de carga triangular, pero en tiempos de aplicación menores el aumento de desplazamiento se vuelve gradual, sin un quiebre en las curvas. Las Figuras 10 y 11 se han separado porque las escalas son diferentes. La identificación de estados a los que se puede asociar pandeo dinámico se discutirá en la sección siguiente.

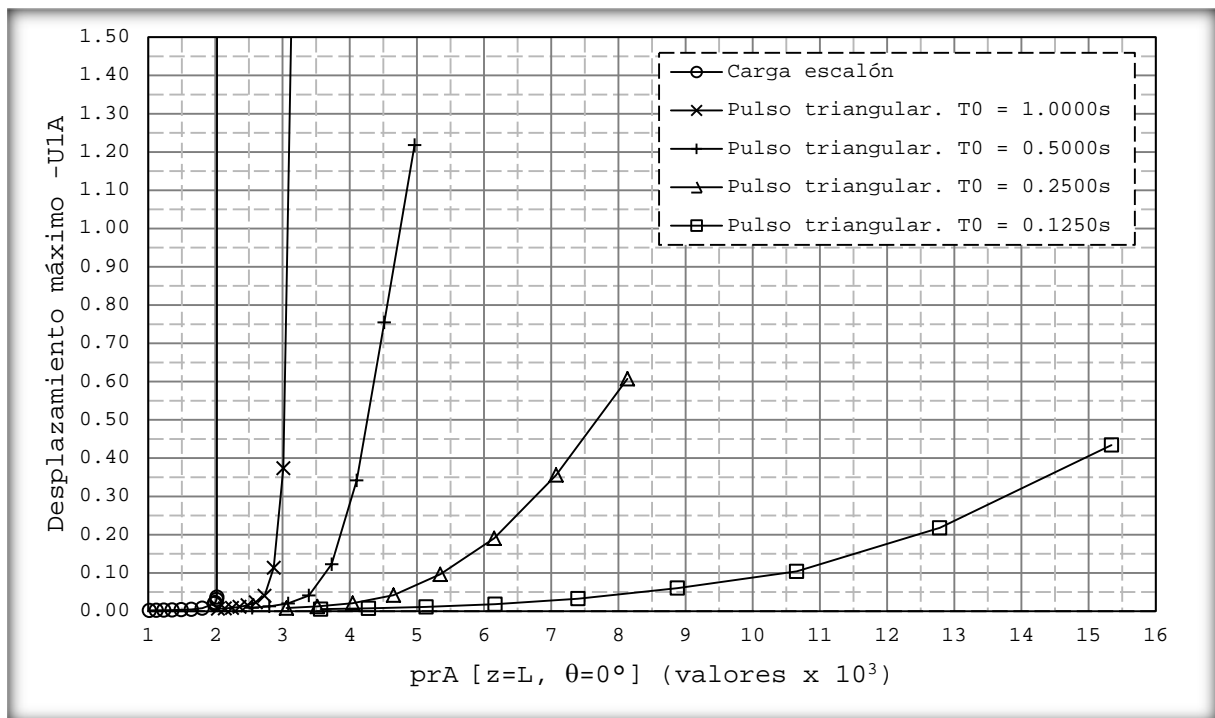


Figura 10: Influencia de la presión y de la duración del pulso. Máximos desplazamientos U_{IA} para duplas $prA-T_0$ (GMNA-D2, salvo curva carga escalón)

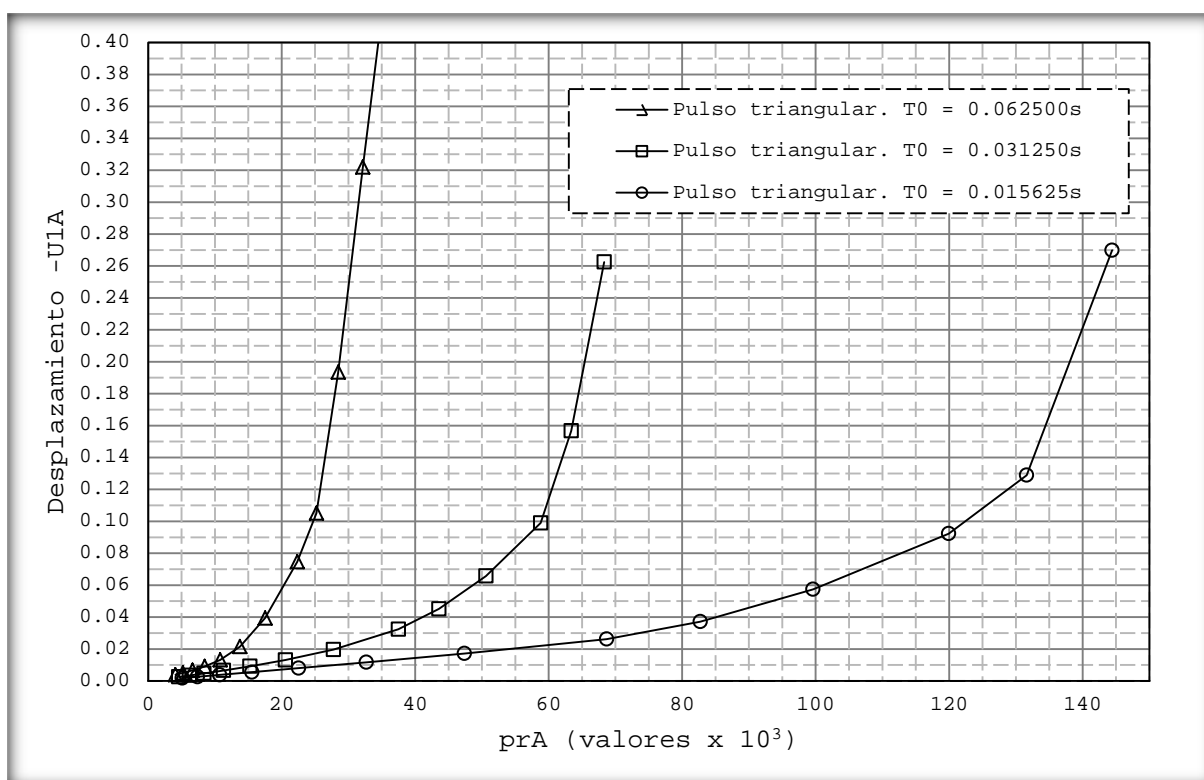


Figura 11: Influencia de la presión y de la duración del pulso. Máximos desplazamientos U1A para duplas prA-T0 (GMNA-D2)

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de bifurcación (LBA) y de trayectoria de equilibrio (GMNA-Riks) muestran plena concordancia con los resultados obtenidos por Flores y Godoy, 1998, para cáscaras cilíndricas sin imperfecciones. La cáscara alcanza su estado límite en pandeo elástico. No hay puntos sobre la cáscara que presenten fluencia del material. Una primera conclusión de importancia es que la criticidad del tanque, y para análisis estáticos, es independiente del hecho de que la distribución espacial sea debida a cargas de viento o a cargas explosivas.

En el caso del análisis GMNA-D1, se ha obtenido el valor de la carga crítica utilizando la propuesta de Budiansky, 1967 y de Budiansky y Roth, 1962. Este criterio propone resolver las ecuaciones de movimiento para incrementos crecientes de cargas y obtener la respuesta en el tiempo. La carga para la cual se obtiene un cambio significativo en la respuesta para un incremento pequeño de carga es considerada la carga de pandeo dinámico (ver Figura 9). Este criterio ha sido utilizado con éxito por numerosos investigadores (Gao y Hoo Fatt, 2012; Flores y Godoy, 1999; Flores y Godoy 1998; Brewer y Godoy, 1996; entre otros).

Se debe prestar especial atención al hecho de que una trayectoria de escape no implica necesariamente la obtención de la carga crítica, es decir de un mínimo, tal es el caso que se da de ejemplo en las curvas (A) y (B) de la Figura 9, por lo que se debe proponer algún algoritmo intermedio para hallar ese punto de mínima carga, por ejemplo, la técnica de punto medio. Los valores obtenidos de pandeo dinámico para carga de tipo escalón son menores que los de pandeo estático y son prácticamente iguales a los de cargas instantáneas de duración infinita. Este resultado está previsto dentro de la bibliografía clásica (ver, por ejemplo, Simitses, 1990) y concuerdan con las conclusiones de Flores y Godoy, 1998, para una cáscara perfecta. Se alcanza el estado límite por pandeo en régimen elástico. No hay puntos

plastificados en el dominio de análisis.

Respecto a los análisis GMNA-D2 (pulso explosivo, [Figura 4](#)), se observa con claridad ([Figura 10](#) y [Figura 11](#)) un incremento de la carga máxima que puede recibir el tanque a medida que se bajan los tiempos de aplicación de las cargas. Este efecto, aunque para otro tipo de cargas e inclusive de estructuras, ha sido reportado en la bibliografía ([Lindberg, 1987](#); [Simites, 1990](#)). Por otra parte se observa que para cargas de larga duración ($3T_n$, aproximadamente de $1s$), el criterio de Budiansky prevalece para la determinación de estados límite elásticos (ver [Figura 10](#)), en tanto que a medida que se va disminuyendo el tiempo de aplicación del impulso T_0 , la conceptualización comentada va perdiendo claridad ([Figura 10](#) y [Figura 11](#)).

Resulta entonces necesario definir algún criterio límite adicional para cargas impulsivas ($T_0/T_n < 0.30s$, [Louca, et al., 2002](#)). 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, por energía elástica acumulada, se recupere y oscile alrededor de la posición indeformada. [Simites, 1990](#), define a un movimiento como inestable si la trayectoria que sigue la estructura frente a una carga dada pasa sobre o encierra otros puntos de equilibrio (estable o inestable). Siguiendo esta definición se cortaron las gráficas de la [Figura 10](#) y de la [Figura 11](#) por un desplazamiento igual al crítico estático según el análisis GMNA-Riks ($U_{IA} = -0.026$) y se obtuvo la gráfica de la [Figura 12](#), de forma hiperbólica, donde se observa una zona donde las cargas críticas tienden a la estática y a las repentinas de duración infinita (grandes tiempos T_0) y un sector de cargas debidas a pulsos explosivos donde la curva crece hiperbólicamente.

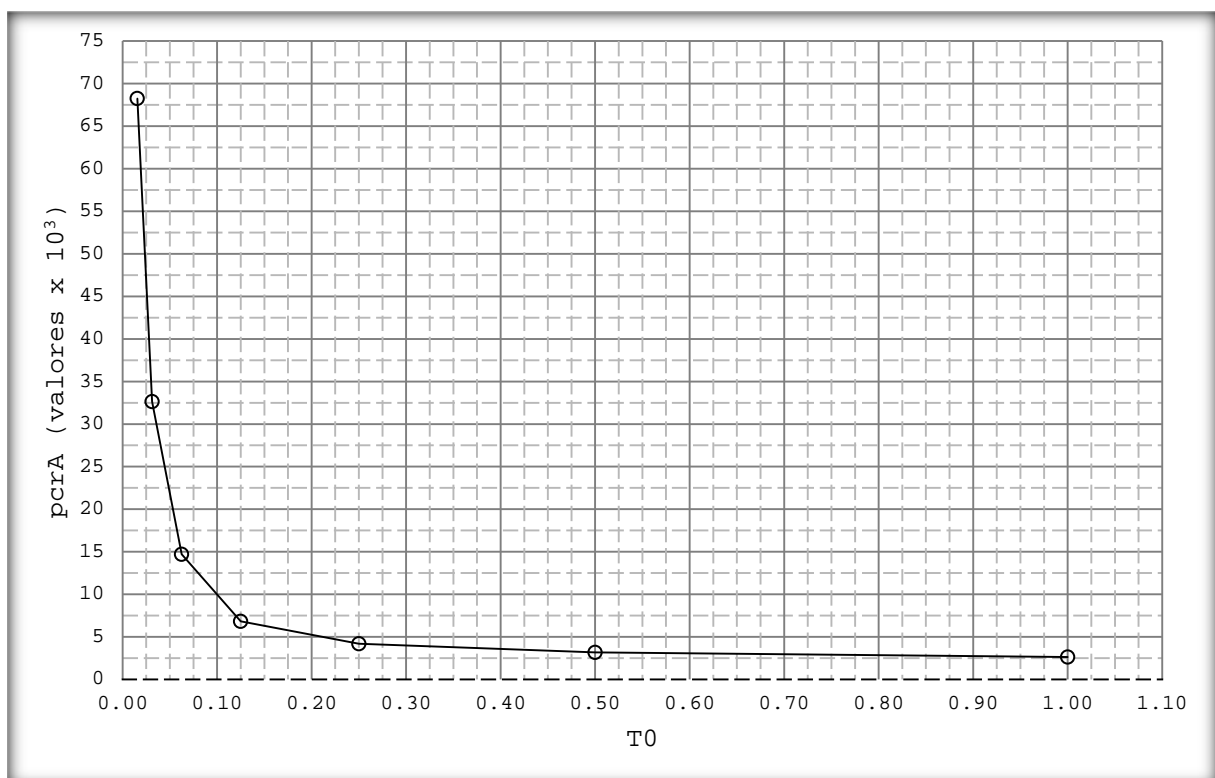


Figura 12: Presión prA crítica definida para distintas duraciones de tiempo de aplicación del pulso

Resultados similares fueron obtenidos por [Lindberg, 1987](#), para pulsos radiales constantes. Se vio, para este caso de estudio y para pulsos $T_0 < 0.25s$, que el impulso ($p_{rA}T_0/2$), se mantiene prácticamente igual a una constante (490.4 para este caso). Esto indica que la zona de pulsos

explosivos es función de p y T_0 , esto es, dado un impulso determinado, se podría predecir la carga (para un T_0 dado) o el tiempo de aplicación (para una p dada), que llevaría a la estructura a una trayectoria inestable.

Resulta instructivo comparar los valores obtenidos con otros enfoques que se encuentran en la literatura (Lindberg, 1987, Duong et al., 2012b). Para un pulso radial de duración T_0 , este enfoque predice, en base a la teoría de Donnell, la carga crítica elástica según la expresión:

$$\left(\frac{P_m}{P_E} - 1\right) \left(\frac{I_m}{I_E} - 1\right) = 1 \quad (5)$$

$$P_E = 0.92 * E * \frac{D}{2*L} * \left(\frac{2*h}{D}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (6)$$

$$I_E = 3 * \rho * c * \frac{D}{2} * \left(\frac{2*h}{D}\right)^2 \quad (7)$$

siendo P_m e I_m la dupla presión-impulso que lleva al tanque a una condición crítica y c la velocidad del sonido en el material del tanque.

Ejemplificando esas expresiones para el tanque considerado en este trabajo, un pulso explosivo $T_0=0.031250s$, lleva a una presión crítica uniforme $p_{cru}=44171.2$. Para el caso de pulso triangular y observando la Figura 12, obtenemos $p_{crA}=32634.6$, lo que indica que los valores críticos de cargas impulsivas radiales, dan resultados por encima de lo analizado en este trabajo en un 35%.

6 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales de acciones debidas a ondas explosivas resultan de utilidad para predecir la distribución espacial de presiones y el impulso. Ambas determinaciones permiten construir el pulso reflejado ideal en cada punto del tanque, $p_r(\theta,t)$; esto puede utilizarse para describir la historia de cargas en análisis computacionales.

Las cargas límite dinámicas para pulsos explosivos son mayores a las estáticas y quedan mejor representadas por el impulso en vez de entenderlas únicamente como cargas de presión. Los resultados numéricos muestran que el campo de validez para el criterio de Budiansky se extiende a cargas instantáneas de larga duración (carga escalón). Para cargas impulsivas, se hace necesario el desarrollo de nuevos criterios. La predicción de carga límite con pulso radial uniforme deja del lado inseguro al diseñador.

Agradecimientos. Los autores agradecen a Dave Waggel por facilitar los resultados de presiones debidas a ondas explosivas sobre modelos rígidos. El segundo autor es miembro de la carrera de investigador del CONICET.

REFERENCIAS

- AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specification, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2010.
- Atkinson, G., Blast damage to storage tanks and steel clad buildings, Process Safety and Environmental Protection, 89: 382-390, 2011.
- Baker, W. E., Kulesz, J.J., Ricker, R. E., Bessey, R. L., Westine, P. S., Parr, V. B., Oldham, G. A., Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels, NASA CR-134906, Washington, D.C., 1977.
- Brewer, A. T., Godoy, L. A., Dynamic buckling of discrete structural systems under

- combined step and static loads, *Nonlinear Dynamics*, 9: 249-264, 1996.
- Budiansky B. and Roth R. S., Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells, in *Collected Papers on Instability of Shell Structures*, NASA TN D-1510, Washington, DC, 597-606, 1962.
- 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.
- Buratti N., Tavano M., Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, in press, DOI: 10.1002/eqe.2326, 2013.
- Burmeister, A., Ramm, E., Dynamic stability analysis of shell structures, in: *Computational Mechanics of Nonlinear Response of Shells*, W. B. Kratzig, E. Oñate (eds.), Springer, Berlin, 152-163, 1990.
- Chamis, C. C., Dynamic buckling and postbuckling of a composite shell, *Int. J. Str. Stab. Dyn.*, 10: 791, 2010.
- Croll, J. G. A., Walker, A. C., *Elements of Structural Stability*, Macmillan, London, 1972.
- Donnell, L. H., *Beams, Plates and Shells*, McGraw-Hill, 1976.
- Duong, D. H., Hanus, J. L., Bouazaoui, L., Pennetier, 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., Pennetier, 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.
- Flores, F. G. and Godoy, L. A., Buckling of short tanks due to hurricanes, *Engineering Structures*, Vol. 20 (8): 752-760, 1998.
- Flores, F. G. and Godoy, L. A., Forced vibrations of silos leading to buckling, *Journal of Sound and Vibration*, 224 (3): 431-454, 1999.
- Gantes, C. J., Kounadis, A. N., Raftoyiannis, J., Bolotin, V. V., A dynamic buckling geometric approach of 2-DOF autonomous potential lumped-mass systems under impact loading, *Int. J. Solids and Structures*, 38: 4071-4089, 2001.
- Gao, Y. and Hoo Fatt, M. X., Dynamic pulse buckling of single curvature composite shells under external blast, *Thin-Walled Structures*, 52: 149-157, 2012
- Glasstone, S. and Dolan P. J., *The effects of nuclear weapons*, 3rd. Edition, The United States Department of Energy: Washington, D.C., 1977.
- Hoo-Fatt, M. S. and Pothula S. G., Dynamic pulse buckling of composite shells subjected to external blast, *Composite Structures*, 92: 1716-1727, 2010.
- Kleiber, M., Kotula, W., Saran, M., Numerical analysis of dynamic quasi-bifurcation, *Engineering Computations*, 4: 48-52, 1987.
- Kounadis, A. N., Raftoyiannis, J., Mallis, J., Dynamic buckling of an arch model under impact loading, *Journal of Sound and Vibration*, 134 (2): 193-202, 1989.
- 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.
- Kroplin, B., Dinkler, D., Dynamic versus static buckling analysis of thin walled shell structures, Chapter 10 in: *Finite Element Methods for Plate and Shell Structures*, volume 2:

- 229–251, T. Hughes and E. Hinton (eds.), Pineridge Press, Swansea, UK, 1986.
- Lindberg, H. E., Dynamic pulse buckling, Theory and experiment, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrech, The Netherlands, 1987.
- Louca, L., Friis, J. Carney, S. J., Response to explosions, Report on CTR106. Imperial College, 2002.
- 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.
- Simitses, G. J., Dynamic Stability of Suddenly Loaded Structures, Springer-Verlag New York Inc., 1990.
- Sosa, E. M. and Godoy, L. A., Nonlinear dynamics of above-ground thin-walled tanks under fluctuating pressures, *Journal of Sound and Vibrations*, 283: 201-215, 2005.
- Tanov, R., Tabiei, A., Static and dynamic buckling of laminated composite shells, Proc. 5th Int. LS-DYNA Users Conf., Southfield, Michigan, 1998.
- Taveau, J., Explosion of fixed roof atmospheric storage tanks, Part 2: Analytical methods to assess safety distances, *Process Safety Progress*, 31 (1): 72–82, 2012.
- 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., Comunicación privada, 2012.