

EVALUACIÓN DE CARGAS POR EXPLOSIONES EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Monaldi, Lucas^{a,b,c}; Elaskar, Sergio^{a,b}

^a CONICET- Instituto de Estudios Avanzados en Ciencia e Ingeniería. Córdoba, Argentina,
lucas.monaldi@unc.edu.ar, selaskar@unc.edu.ar

^b Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Departamento de Ingeniería Aeroespacial. Córdoba, Argentina.

^c Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Departamento de Estructuras. Córdoba, Argentina.

Palabras clave: cargas por explosión, blast wave, tanques de almacenamiento, OpenFOAM.

RESUMEN

El trabajo presenta una herramienta numérica basada en el software de distribución libre OpenFOAM diseñada para predecir las cargas de presión que impactan sobre estructuras, en particular tanques de almacenamiento de combustible, durante una explosión. El modelo fue validado frente a soluciones analíticas, resultados semiempíricos y datos experimentales, demostrando una precisión aceptable dada la complejidad del fenómeno. El estudio se centra en caracterizar la interacción de la onda de choque con la superficie del tanque, identificando la formación de estructuras complejas como la pierna de Mach. Los resultados revelan que la altura de la detonación altera drásticamente la distribución de presiones, encontrándose que las explosiones en altura pueden generar solicitaciones más severas y localizadas que las explosiones a nivel del suelo. Este hallazgo subraya la importancia de considerar la ubicación de la fuente de explosión para un diseño estructural seguro. La metodología permite evaluar riesgos y diseñar mecanismos de atenuación a un costo computacional reducido.

ABSTRACT

This work presents a numerical tool based on the open-source software OpenFOAM designed to predict pressure loads impacting structures, specifically fuel storage tanks, during an explosion. The model was validated against analytical solutions, semi-empirical results, and experimental data, demonstrating acceptable accuracy given the complexity of the phenomenon. The study focuses on characterizing the blast wave interaction with the tank surface, identifying the formation of complex structures such as the Mach stem. The results reveal that detonation height drastically alters pressure distribution, showing that elevated explosions can generate more severe and localized stresses than ground-level explosions. This finding emphasizes the importance of considering the three-dimensional location of the explosion source for safe structural design. The methodology allows assessing risks and design mitigation mechanisms at a reduced computational cost.

Organiza:

1. INTRODUCCIÓN

Las explosiones accidentales en complejos industriales representan una de las amenazas más severas para la integridad de las infraestructuras críticas. Entre estas, los tanques atmosféricos de almacenamiento de combustible son especialmente vulnerables debido a su configuración geométrica de pared delgada (típicamente entre 6 y 25 mm de espesor), registrando históricamente más del 30% de los accidentes catastróficos por eventos concatenados en la industria de procesos (Godoy, 2002; Kletz, 2019). La interacción de una onda de choque (*blast wave*) con estas estructuras cilíndricas genera patrones de carga transitorios sumamente complejos y asimétricos, dominados por efectos de difracción y reflexiones sobre superficies, proceso que resulta altamente inestacionario (Shirbhate, 2021). Desafortunadamente, los métodos de diseño estructural convencionales suelen simplificar en exceso estas acciones dinámicas, asumiendo distribuciones de presión uniformes o cuasi-estáticas que no reflejan la transferencia real de energía de la *blast wave* a la estructura.

En la ingeniería de riesgos tradicional, es habitual adoptar la hipótesis de que las detonaciones ocurren exclusivamente al nivel del terreno, asumiendo frentes de onda hemisféricos ideales. No obstante, la realidad operativa de las plantas de procesos incluye racks de tuberías elevados, antorchas de venteo y techos de recipientes a presión, escenarios capaces de originar explosiones a varios metros sobre el suelo. Esta elevación de la fuente altera drásticamente la estructura de onda incidente y da lugar a la formación de la pierna de Mach (*Mach stem*) debido a la reflexión previa con el terreno (Monaldi et al., 2025)¹. La literatura experimental previa, como los ensayos a pequeña escala de Duong (2012), presenta serias limitaciones para caracterizar este régimen debido a un muestreo espacial grueso que enmascara los picos de sobrepresión localizada. Por otro lado, dichos antecedentes validan que el uso de la hipótesis de contornos estructurales rígidos es perfectamente para la predicción del campo de presiones reflejadas (Codina, 2013), lo que simplifica y viabiliza la modelación computacional avanzada enfocada en la determinación de las cargas mecánicas.

Con el propósito de mitigar estas incertidumbres, este trabajo desarrolla un estudio paramétrico que evalúa el impacto de la altura de la explosión sobre la distribución espacial de cargas en un tanque cilíndrico de escala industrial (12 m de altura y 15 m de diámetro). Utilizando el *software* de libre distribución OpenFOAM y el esquema de alta resolución de Kurganov, Noelle y Petrova (KNP), ampliamente validado para flujos compresibles con discontinuidades fuertes (Kurganov et al., 2000; Greenshield et al.,

¹ El presente trabajo es una versión sintética del artículo presentado en la revista [Process Safety and Environmental Protection](#), titulado "Parametric study of explosion height effects on blast loading characteristics for cylindrical storage tanks using cfd" (DOI: [10.1016/j.psep.2025.107782](#)).

2010; Gutiérrez Marcantoni et al., 2021), se simula la liberación instantánea de una energía equivalente a 650 kg de TNT ($1 \text{ kg TNT} = 4.184 \times 10^6 \text{ Joules}$). Manteniendo una distancia horizontal entre la carga y el tanque (ver Fig. 1) constante de 30 m, la cota de la detonación se varía sistemáticamente desde el nivel del suelo ($H=0 \text{ m}$) hasta la altura del techo del tanque ($H=12 \text{ m}$). El análisis se centra en cuantificar las dos variables fundamentales para la verificación estructural y la verificación de estados límite de pandeo: la sobrepresión pico reflejada y el impulso específico positivo en las paredes del tanque. Los resultados permiten contrastar los supuestos normativos con perfiles de carga resueltos en el tiempo, proporcionando criterios técnicos precisos para optimizar la seguridad y el diseño de recipientes cilíndricos delgados.

1.1. Validación del Marco Numérico y Sustento Metodológico

Dada la no linealidad de la dinámica de gases compresibles y la naturaleza transitoria de las interacciones onda-estructura, la aplicación del modelo computacional a tanques de escala industrial requiere un proceso previo de validación. Con este propósito, el esquema numérico KNP de alta resolución implementado en OpenFOAM fue sometido a un proceso de validación previo (Monaldi et al., 2022; Monaldi et al., 2026).

La primera fase consistió en una validación metodológica y analítica orientada a verificar la conservación de la energía y la precisión cinemática del frente de choque en campo libre. Para ello, las simulaciones numéricas se contrastaron con las soluciones analíticas de similitud de Sedov para explosiones fuertes en medios infinitos, obteniéndose variaciones porcentuales inferiores al 5% en los perfiles de presión y velocidad del fluido. Asimismo, se evaluó la capacidad del algoritmo para capturar los procesos de reflexión inestacionaria sobre contornos sólidos planos. El modelo mostró una alta fidelidad para resolver de forma puramente hidrodinámica, sin requerir la introducción de modelos químicos adicionales, las transiciones complejas entre regímenes de reflexión regular (RR) y reflexiones de Mach simples, dobles y modificadas (SMR, DMR, TMR), fenómenos que gobiernan la amplificación local de presiones tras una detonación (Monaldi et al., 2022).

La segunda fase abordó la validación experimental para consolidar *so/ver* como una herramienta fiable para simular el efecto de explosiones sobre estructuras (Monaldi et al., 2026). Las predicciones de sobrepresión pico e impulso específico positivo se compararon inicialmente con las curvas semiempíricas del manual de diseño militar UFC 3-340-02 (UFC-340-02, 2008). Posteriormente, el desempeño del modelo se sometió a una prueba de validación física frente a los ensayos experimentales a escala reducida en tanques de almacenamiento atmosféricos conducidos por Duong (2012).

Los resultados numéricos reprodujeron con precisión aceptable los gradientes espaciales de carga circunferenciales y verticales registrados en los ensayos. Esta etapa experimental permitió además corroborar que la hipótesis de contornos estructurales rígidos no introduce desvíos significativos en la estimación del campo de presiones reflejadas, respaldando la simplificación geométrica adoptada en este análisis paramétrico como una solución óptima en términos de precisión física y costo computacional.

2. CONFIGURACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Para el desarrollo del análisis paramétrico, se definió un dominio computacional tridimensional cuyo esquema geométrico se presenta en la Figura 1. El modelo consta de un tanque de almacenamiento cilíndrico de pared delgada cerrado con dimensiones representativas de la práctica industrial: una altura total de 12m y un diámetro de 15m. La distancia de separación (*stand-off*) entre el núcleo de la detonación y la generatriz frontal más expuesta de la estructura se mantiene constante en 30m. A fin de caracterizar el efecto de la elevación de la fuente, la cota del punto de explosión (H) varía sistemáticamente desde el nivel del terreno (0m), que representa una condición de carga superficial pura, hasta la cota máxima del techo del tanque (12m), preservando en todos los escenarios el *stand-off* de 30m. Las fronteras laterales y posterior del dominio numérico se posicionaron a una distancia de 11.25m respecto a la envolvente cilíndrica, dimensión calibrada para mitigar eventuales efectos de borde o reflexiones espurias provenientes de los contornos externos (Monaldi et al., 2025).

La explosión se modeló mediante la liberación instantánea de energía equivalente a una masa de 650kg de TNT. La presión inicial en el núcleo de la explosión se determina analíticamente mediante la Ecuación (Marcantoni et al., 2021):

$$p_{0i} = \frac{3(\gamma-1)E_{0i}}{(\beta+1)\pi R(0)^\beta} \quad (1)$$

donde γ representa la razón de calores específicos del fluido, E_{0i} es la energía total inicial introducida y el parámetro β gobierna la dimensionalidad geométrica del frente de onda ($\beta=2$ para frentes de choque cilíndricos y $\beta=3$ para frentes esféricos). La temperatura se calcula mediante la ecuación de estado de los gases ideales bajo una condición de densidad constante entre el núcleo energético y el medio circundante, mientras que el campo global de velocidades iniciales (U) se establece en reposo absoluto (0m/s).

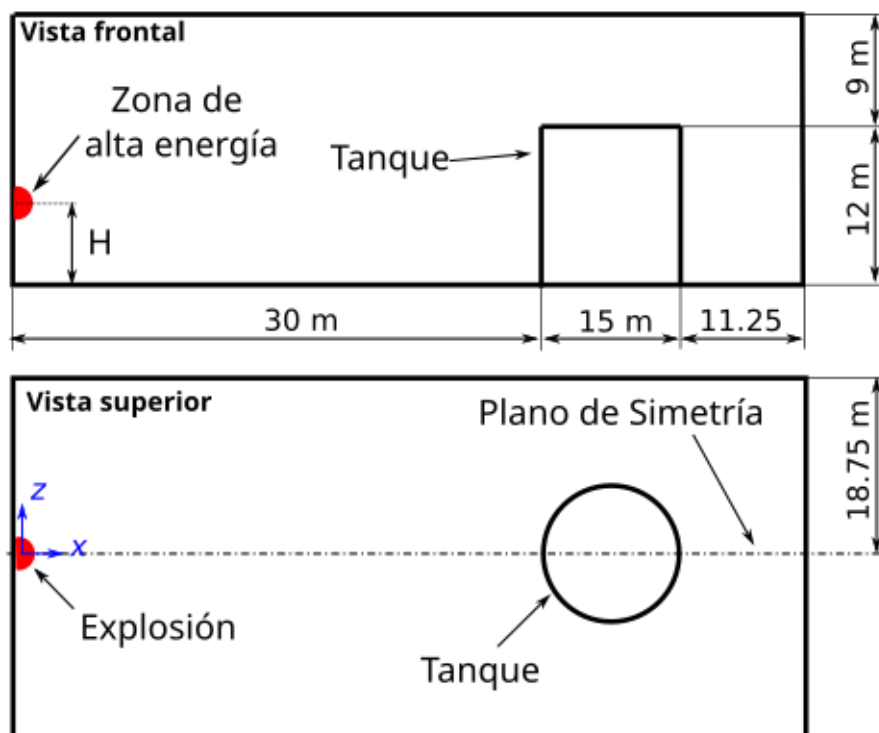


Figura 1. Dominio computacional utilizado en las simulaciones numéricas. Todas las dimensiones están en metros.

La magnitud de la carga (650kg de TNT) se seleccionó en consonancia con los umbrales de vulnerabilidad estructural reportados por Godoy et al. (2023), calibrándose para inducir una sobrepresión pico incidente en campo libre de aproximadamente 70kPa inmediatamente antes de impactar contra la estructura. Por su parte, la distancia de separación de 30m (equivalente a dos veces el diámetro del tanque) se adoptó siguiendo los antecedentes de seguridad intrínseca recopilados por Tauseef et al. (2018), donde se documentan las distancias de separación críticas y los mecanismos de falla concatenada (efecto dominó) en accidentes reales de parques de almacenamiento. Asimismo, esta longitud de propagación horizontal resulta óptima para capturar con rigor numérico el desarrollo transitorio y el crecimiento de la pierna de Mach a medida que el frente de choque interactúa con el terreno antes de alcanzar el tanque.

3. PREPROCESAMIENTO DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En primer lugar, para modelar adecuadamente un entorno de atmósfera abierta (campo libre) dentro de un volumen computacional finito, es crucial la correcta definición de las condiciones de borde. Las fronteras externas del dominio (límites laterales y posterior) se configuraron utilizando condiciones de salida no reflectantes

(wave transmissive). El propósito de este tratamiento es permitir que las ondas de choque y las perturbaciones secundarias abandonen el espacio virtual libremente una vez que han interactuado con el tanque, impidiendo que reboten artificialmente hacia el interior del dominio. De este modo, se asegura que las cargas registradas sobre la envolvente cilíndrica correspondan exclusivamente al fenómeno de la explosión directa y su reflexión con el suelo, emulando con fidelidad un escenario real.

La determinación del margen libre de 11.25m alrededor de la estructura (Figura 1) se fundamentó en un análisis de sensibilidad del dominio. Este estudio consistió en ensayar progresivamente espacios virtuales más amplios para verificar que la proximidad de las fronteras no interfiriera en los complejos fenómenos de difracción del aire y desprendimiento de vórtices detrás del cilindro. Los perfiles temporales de sobrepresión demostraron que extensiones mayores del dominio no modificaban la carga sobre el tanque, validando las dimensiones adoptadas como una solución óptima que equilibra el rigor de la física del problema con una demanda computacional eficiente.

Asimismo, la capacidad para capturar con nitidez las discontinuidades extremas de una onda de choque depende críticamente del tamaño de los elementos que componen la malla de cálculo. Los elementos empleados fueron mayormente tetraédricos, concentrando una mayor densidad y menor tamaño en las zonas cercanas a las paredes del tanque donde ocurren los mayores gradientes. Con este fin, se realizó un análisis de sensibilidad de malla comparando diferentes densidades de discretización espacial. Este control de calidad permitió demostrar la convergencia del modelo, asegurando que los picos de sobrepresión e impulso calculados sobre las placas del tanque alcancen un valor independiente del tamaño de celda seleccionado. La resolución final elegida garantiza que el frente de choque no sufra una atenuación o "suavizado" artificial debido a mallas excesivamente gruesas, preservando la energía real del impacto sin comprometer el costo computacional de las simulaciones. Por otra parte, debido a la naturaleza transitoria del fenómeno y a las velocidades supersónicas de la blast wave, el avance de la simulación requirió una alta resolución temporal, con pasos de tiempos cercanos a $\Delta t \sim 10^{-5}$ segundos. El paso de tiempo se reguló de forma dinámica y adaptativa mediante el criterio de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Esta restricción asegura que la onda de choque no avance una distancia mayor al tamaño de una sola celda en un único intervalo temporal.

Finalmente, las simulaciones numéricas correspondientes a cada escenario paramétrico se ejecutaron en el clúster de alto rendimiento Serafín de la UNC². El procesamiento en paralelo demandó el uso de 128 núcleos de cómputo, registrando

² [Centro de Computación de Alto Desempeño \(CCAD\) de la Universidad Nacional de Córdoba.](#)

un tiempo de ejecución estimado de 48 horas por caso analizado y generando un volumen de datos crudos cercano a los 60 GB por simulación.

4. ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LAS SOLICITACIONES MÁXIMAS EN EL TANQUE

Con el objetivo de evaluar la distribución de las acciones de una detonación sobre la superficie de un tanque atmosférico, se estructuró un estudio paramétrico centrado en la variación de la altura de la fuente explosiva (H). En la práctica convencional del diseño normativo, suele asumirse de forma simplificada que las explosiones al nivel del suelo representan la condición más crítica debido al confinamiento inicial del frente de onda semiesférico. Sin embargo, este enfoque omite el impacto de las reflexiones inestacionarias y el desarrollo de la pierna de Mach, fenómeno originado por la interacción de la onda de choque con el terreno antes de alcanzar la estructura.

Para este análisis, se evaluaron seis escenarios de carga manteniendo una distancia de separación (stand-off) constante de 30m respecto al frente del tanque, variando sistemáticamente la cota de la detonación (H) entre 0.0 m y 12.0 m, con incrementos discretos de 2.4 m (denominados Casos 1 al 6).

El procesamiento de los campos de presión transitorios se ejecutó mediante las herramientas de postproceso numérico de OpenFOAM y ParaView. A fin de mapear con alta fidelidad las demandas mecánicas sobre la estructura, se dispuso una matriz de control de 209 puntos de monitoreo sobre la envolvente cilíndrica. Aprovechando la simetría geométrica del problema, se instrumentó numéricamente la mitad del tanque (Figura 1), cubriendo 11 cotas de altura (desde la base a 0m hasta los 12m) y 19 posiciones angulares circunferenciales (de 0° a 180°).

Una primera aproximación de alto valor para el diseño estructural consiste en identificar qué escenario de altura de explosión gobierna las máximas solicitaciones locales, independientemente de sus magnitudes absolutas. La Figura 2 expone el porcentaje de puntos analizados sobre las paredes del tanque que alcanzan su máxima sobrepresión e impulso máximo positivo reflejado para cada altura H de la explosión a una distancia horizontal de 30m. En otras palabras, se estudian los 209 puntos de monitoreo alrededor y a lo alto del tanque y se comparan entre las diferentes alturas de la explosión los valores máximos obtenidos. Por ejemplo, la Figura 2 izquierda muestra que, el 64.11% de los 209 puntos de monitoreo observaron una presión mayor cuando la explosión ocurrió a una altura de $H=9.6$ m.

Un hallazgo crítico derivado de estos resultados es que ninguno de los 209 sensores instrumentados registró sus valores máximos de presión o impulso bajo la condición de explosión en el suelo ($H=0$ m). Esta observación evidencia que las hipótesis

tradicionales de carga superficial resultan insuficientes y pueden conducir a un diseño que subestime las demandas locales en tanques de almacenamiento.

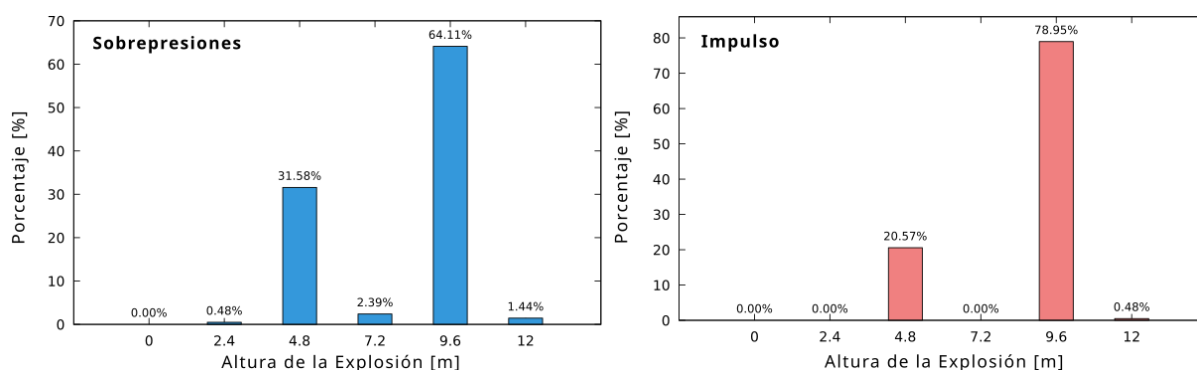


Figura 2. Porcentaje de casos donde, para un punto dado, la máxima sobrepresión (imagen izquierda) y el máximo impulso (imagen derecha) reflejado sobre la pared del tanque ocurrió a una altura de explosión H específica (distancia de separación de 30 m).

A nivel general, la mayor concentración de máximos locales se produjo en las detonaciones elevadas a $H=4.8\text{m}$ y $H=9.6\text{m}$, lo que motivó la extensión del análisis paramétrico hacia distancias de separación menores para verificar la persistencia de esta tendencia. Al reducir el stand-off a 20m (Figura 3) y a 10m (Figura 4), se observó un comportamiento análogo, consolidando el riesgo asociado a las fuentes elevadas.

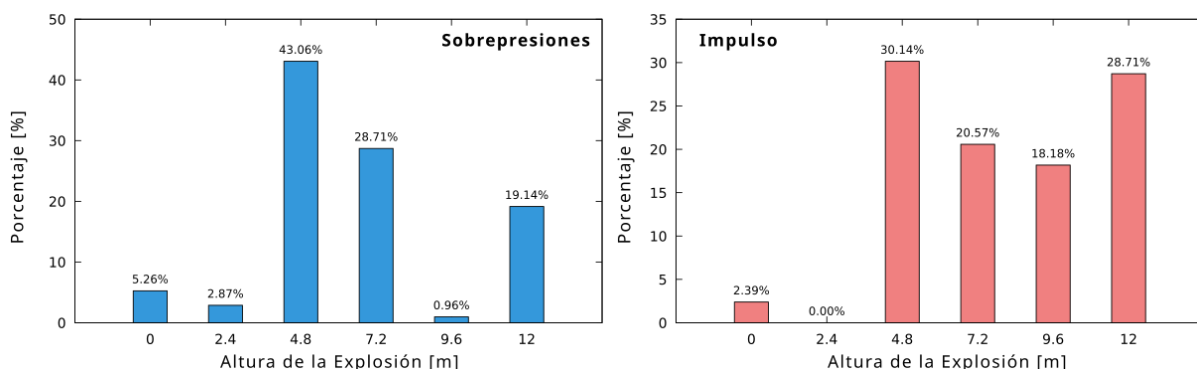


Figura 3. Porcentaje de casos donde, para un punto dado, la máxima sobrepresión (imagen izquierda) y el máximo impulso (imagen derecha) reflejado sobre la pared del tanque ocurrió a una altura de explosión H específica (distancia de separación de 20 m).

No obstante, el análisis comparativo revela que, a medida que la fuente se aproxima a la estructura, una pequeña fracción de puntos comienza a registrar sus máximos en el escenario superficial ($H=0\text{m}$). Este fenómeno responde directamente a la física del problema (como se verá en la siguiente sección): la pierna de Mach requiere una determinada distancia de propagación horizontal para desarrollarse y ganar altura; por lo tanto, en condiciones de campo cercano, el frente esférico original impacta al tanque antes de que la reflexión con el terreno modifique sustancialmente la estructura global

de la onda.

Asimismo, en las distancias de 20m y 10m se detectó una divergencia interesante entre las variables de diseño: los impulsos máximos específicos muestran una marcada tendencia a concentrarse en las detonaciones de mayor altura ($H \geq 9.6\text{m}$), mientras que las sobrepresiones pico presentan mayor dispersión e incidencia en alturas bajas e intermedias ($H \leq 4.8\text{m}$). Aunque esta distribución varía según la posición en la circunferencia del cilindro, las solicitaciones más importantes para la estabilidad global se localizan en la cara frontal expuesta ($\theta = 0^\circ$), es decir, la cara donde impacta por primera vez la onda.

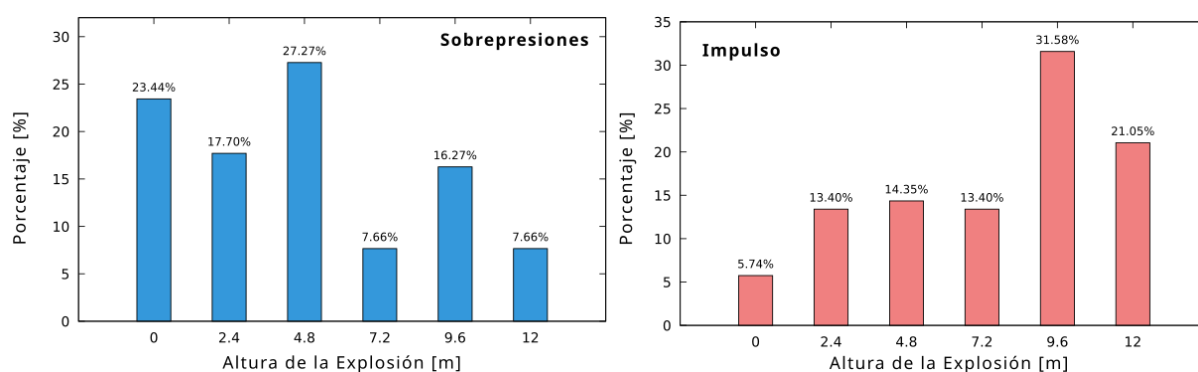


Figura 4. Porcentaje de casos donde, para un punto dado, la máxima sobrepresión (imagen izquierda) y el máximo impulso (imagen derecha) reflejado sobre la pared del tanque ocurrió a una altura de explosión H específica (distancia de separación de 10 m).

5. MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL FRENTE DE ONDA INCIDENTE

Los patrones de solicitación máxima descritos previamente sugieren que la interacción de la onda de choque con el terreno altera drásticamente la distribución espacial de las presiones antes de impactar la estructura. El propósito de este apartado es caracterizar la morfología transitoria de la *blast wave* en el instante previo al impacto y, simultáneamente, demostrar que los modelos analíticos simplificados que asumen un frente de onda plano y de presión uniforme en altura no constituyen una aproximación segura ni adecuada para el diseño de tanques atmosféricos.

El comportamiento del fluido compresible se evidencia al examinar los mapas de contornos de presión detallados en la Figura 5 para las seis configuraciones analizadas. En los escenarios de baja elevación, correspondientes a $H=0.0\text{m}$ y $H=2.4\text{m}$ (gráficos **a** y **b**), la liberación de energía induce un frente de onda predominantemente esférico, dado que la proximidad al suelo impide el desarrollo aislado de ondas secundarias. En otras palabras, no se produce la reflexión necesaria con el suelo para la formación de una segunda onda de choque. No obstante, al elevar

la fuente de energía en los escenarios de $H=4.8\text{m}$ a $H=12.0\text{m}$ (gráficos **c**, **d**, **f** y **g**), se constata una transición hacia un régimen de reflexión irregular con el terreno. Este fenómeno da origen a una segunda onda de choque de alta intensidad, conocida como la pierna de Mach (*Mach stem*), cuyo desarrollo físico resulta consistente con la teoría clásica de reflexión de choques inestacionarias documentada en Ben-Dor (2008).

La configuración geométrica del frente de onda incidente introduce mecanismos de carga diferenciados según la cota de la detonación. Para el escenario de $H=7.2\text{m}$, la pierna de Mach domina la zona inferior del campo de flujo, provocando que las presiones incidentes iniciales sean severamente mayores en la base del cilindro. Por el contrario, en las detonaciones de mayor elevación ($H=9.6\text{m}$ y $H=12.0\text{m}$), el frente incidente original alcanza el cuerpo del tanque en cotas medias y superiores antes de la llegada de la onda reflejada en el suelo. Esto desencadena un fenómeno de superposición altamente complejo e inestacionarios en la envolvente, donde la respuesta estructural inicial ante la onda directa interactúa de forma transitoria con el impacto consecutivo de la pierna de Mach en la base.

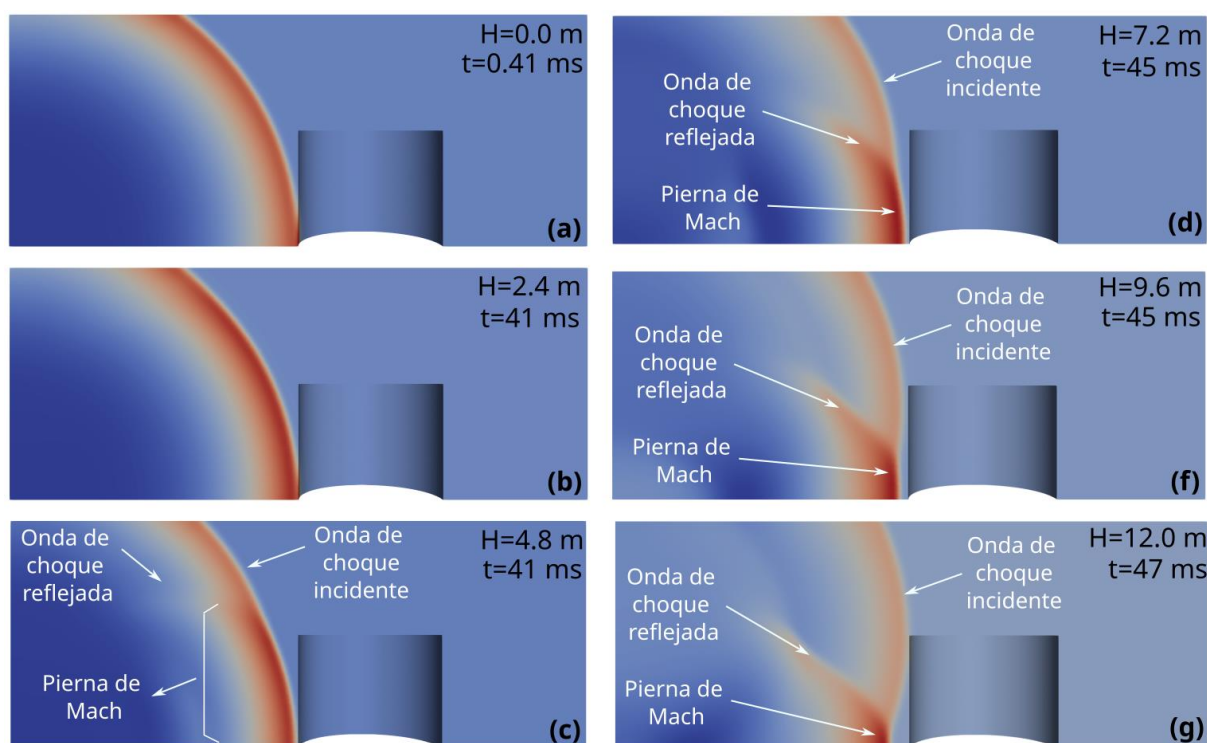


Figura 5. Contornos de presión para las seis alturas de explosión propuestas en el instante previo al impacto contra el frente del tanque. El tiempo de simulación y la altura de explosión H se indican en la esquina superior derecha de cada imagen.

Por otra parte, la Tabla 1 expone la variación de la altura de la pierna de Mach en

función de la elevación de la fuente. Los datos numéricos confirman una relación inversa: a la distancia de control estudiada, la altura del vástago de Mach disminuye a medida que aumenta la cota inicial de la explosión, modificando de forma paralela la trayectoria espacial del punto triple (la intersección entre la onda incidente, reflejada y de Mach). Dado que la intensidad de la pierna de Mach supera la presión del frente incidente original, la posición de este punto triple actúa como una frontera móvil que delimita las zonas de máxima transferencia de energía hacia la estructura.

Altura de la Explosión [m]	Altura de la Pierna de Mach [m]
0.0	0.0
2.4	0.0
4.8	13.21
7.2	8.36
9.6	3.68
12.0	3.19

Tabla 1. Altura de la pierna de Mach para cada altura inicial de explosión.

Esta variabilidad morfológica explica por qué la localización de las máximas demandas estructurales no sigue una tendencia lineal. La complejidad inherente a la interacción de frentes esféricos y reflexiones con el terreno justifica que los picos globales de sobrepresión se concentren tanto en regímenes de transición inicial ($H=4.8\text{m}$) como en escenarios con piernas de Mach maduras y de alta energía ($H=9.6\text{m}$). En consecuencia, queda en evidencia la vulnerabilidad de las metodologías de diseño que asumen distribuciones de presión constantes en la altura del tanque; omitir estos gradientes espaciales inducidos por explosiones elevadas puede conducir a subestimar gravemente las acciones de diseño en las placas de la envolvente cilíndrica.

5.1. Explosión a nivel del suelo $H = 0.0\text{ m}$

El primer escenario detallado corresponde a una detonación ubicada al nivel del suelo ($H=0.0\text{ m}$), configuración que constituye el caso de referencia convencional en la literatura técnica de diseño estructural. En esta condición, debido a que la liberación de energía ocurre directamente sobre el suelo, el frente de onda se propaga desde su origen como un frente de onda hemisférico. Esto suprime la aparición de reflexiones secundarias previas con el terreno y el desarrollo de la pierna de Mach. Los mapas de

contornos transitorios de presión, correspondientes a seis instantes secuenciales posteriores al contacto inicial con la estructura, se exponen en la Figura 6.

Para analizar cuantitativamente la variación de las cargas sobre la generatriz frontal más expuesta, la Figura 7 ilustra los perfiles de sobrepresión reflejada a lo largo de la altura en el frente del tanque ($\theta=0^\circ$) para los mismos intervalos temporales. Las curvas asociadas a las etapas iniciales del impacto, específicamente a los 45ms (línea negra) y 49ms (línea roja), revelan que la magnitud de la sobrepresión reflejada instantánea no es homogénea en la vertical; por el contrario, experimenta variaciones significativas con la altura conforme el frente de choque progresa y se difracta sobre la superficie cilíndrica de la envolvente. A medida que el tiempo avanza, estos picos de presión localizados decrecen de manera gradual debido a la expansión geométrica del fluido.

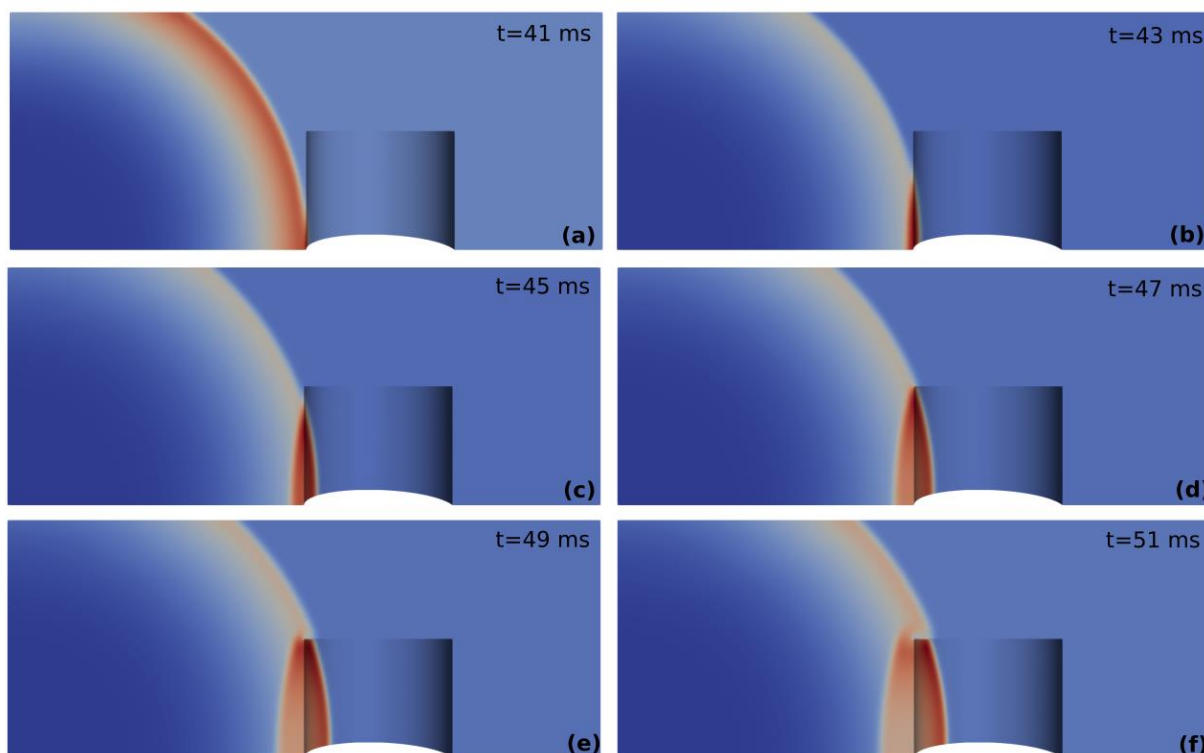


Figura 6. Contornos de presión para seis tiempos diferentes tras el contacto de la onda con el tanque para una explosión a $H=0m$.

El análisis de los instantes subsecuentes (55ms, 59ms y 65ms), muestra que la acción dinámica sobre la pared se disipa progresivamente, tendiendo hacia una distribución cuasi-constante en altura conforme el fenómeno entra en su fase de alivio o rarefacción. Este comportamiento evidencia un aspecto fundamental para el cálculo estructural: incluso ante la hipótesis analítica de una carga hemisférica ideal, la distribución espacial de las presiones es marcadamente no uniforme durante los

momentos de mayor transferencia de energía (la fase inicial del impacto). Finalmente, cabe destacar que las configuraciones de baja elevación, tales como el escenario con $H=2.4\text{m}$, exhiben una morfología de flujo y una evolución temporal de presiones altamente análogas a las descritas para este caso de referencia terrestre.

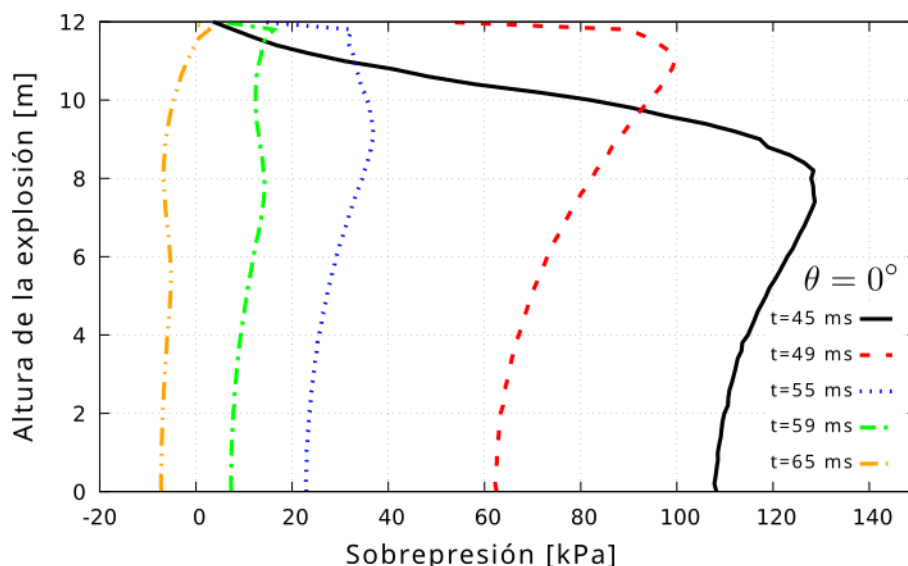


Figura 7. Distribución de sobrepresiones reflejadas al alcanzar el tanque para seis tiempos diferentes ($H=0\text{m}$).

5.2. Escenario de Elevación Intermedia: Detonación a $H=4.8\text{ m}$

El siguiente escenario bajo análisis evalúa una elevación intermedia de la fuente fijada en $H=4.8\text{m}$. Esta configuración geométrica reviste una especial importancia para el diseño estructural, dado que demostró ser la segunda condición más desfavorable en términos de demandas de impulso específico para una distancia de separación (stand-off) de 30m (Figura 2) y la hipótesis más crítica cuando el frente de la detonación se aproxima a los 20m (Figura 3). A esta distancia, la estructura de ondas muestra que la pierna de Mach ya se encuentra completamente consolidada, exhibiendo una altura remanente que incluso supera la cota total de la estructura cilíndrica (Figura 5). No obstante, aunque la morfología general del frente de onda guarda similitudes con el caso de referencia a nivel del terreno, las sobrepresiones resultantes sobre las placas de la envolvente cilíndrica presentan diferencias cuantitativas sustanciales. Los mapas de contornos transitorios de presión tras el contacto inicial se detallan para este caso en la Figura 8.

Con el propósito de evaluar la distribución vertical de las cargas mecánicas, la Figura 9 expone los perfiles de sobrepresión en la zona frontal del tanque ($\theta=0^\circ$) para los instantes de 43, 45, 49, 55, 59 y 65ms . En las curvas analizadas durante las etapas

del impacto temprano, se constata de qué manera la sobrepresión reflejada máxima instantánea se incrementa de forma monótona con la cota de altura del tanque a medida que progresa el proceso de reflexión de la onda de choque. De manera análoga a los escenarios previos, la acción dinámica sobre la pared tiende a estabilizarse y uniformarse en las fases tardías del fenómeno debido al alivio por difracción; sin embargo, el gradiente vertical de presiones resulta marcadamente pronunciado durante el intervalo del impacto inicial, el cual constituye el período de mayor criticidad para la verificación de la estabilidad global.

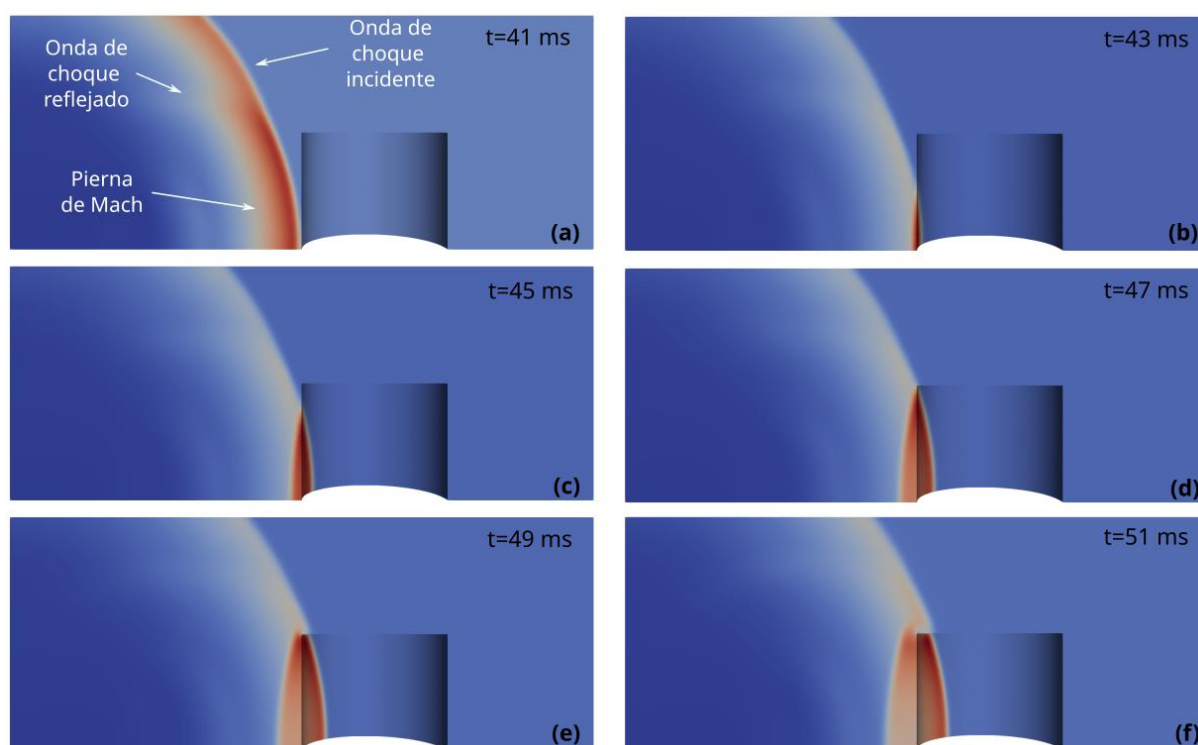


Figura 8. Contornos de presión para seis tiempos diferentes tras el contacto de la onda con el tanque para una explosión a $H=4.8m$.

Las particularidades observadas en esta cota de elevación intermedia marcan el límite de los regímenes de carga donde la pierna de Mach envuelve completamente al cilindro. Este comportamiento establece las bases para el estudio de los escenarios subsiguientes de mayor altura ($H=7.2m$, $9.6m$ y $12.0m$), donde la física del problema se modifica sustancialmente debido a la clara diferenciación y desfase temporal entre el impacto del choque incidente directo y la llegada diferida de la pierna de Mach a la base.

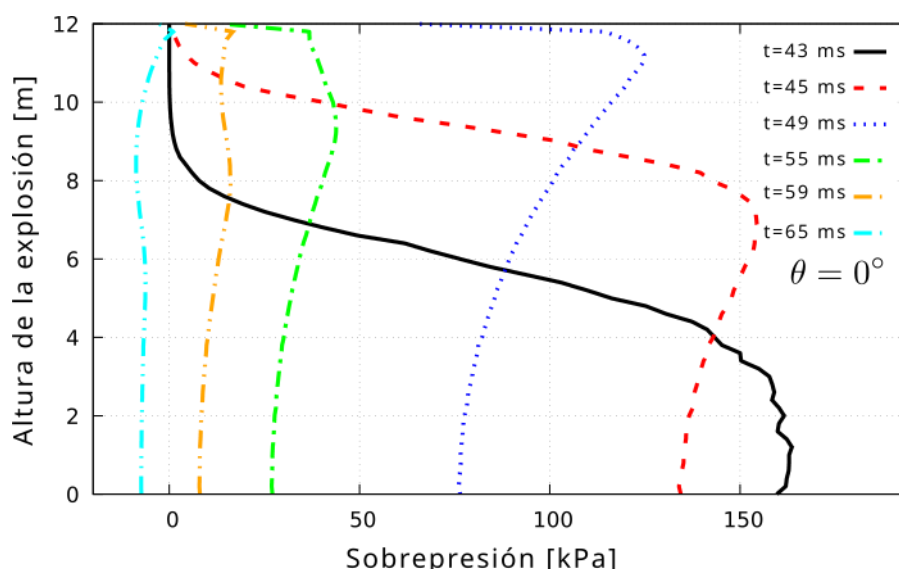


Figura 9. Distribución de sobrepresiones reflejadas al alcanzar el tanque para seis tiempos diferentes ($H=4.8\text{m}$).

5.3. Escenario Crítico de Máxima Demanda: Detonación a $H=9.6\text{ m}$

El análisis culmina con la evaluación de la cota de elevación fijada en $H=9.6\text{m}$, configuración que, de acuerdo con los resultados paramétricos globales, se consolida como el escenario de diseño más desfavorable o crítico para la integridad de la estructura. A nivel morfológico, la configuración tridimensional de los frentes de onda para las elevaciones de $H=7.2\text{m}$ y $H=9.6\text{m}$ exhibe patrones cualitativos similares; en consecuencia, los perfiles espaciales de presión reflejada resultan comparables en su distribución general. Este escenario se caracteriza por una intensificación de la pierna de Mach, lo que se traduce en magnitudes de sobrepresión reflejada sustancialmente superiores. Los mapas de contornos transitorios asociados a esta envolvente de carga se presentan en la Figura 10.

Al examinar cuantitativamente la evolución temporal sobre la cara frontal ($\theta=0^\circ$), el impacto rezagado de la pierna de Mach se convierte en el mecanismo de transferencia de energía. En los instantes de 49ms y 55ms (Figura 11), la acción de la pierna de Mach es claramente identificable en los perfiles de sobrepresión. A diferencia de los casos de bajas elevaciones, la concentración de energía en esta onda secundaria confinada cerca de la base induce picos de sobrepresión localizados de gran magnitud. Estos picos se amplifican a medida que el frente comprimido progresa y se difracta sobre la curvatura inferior de la envolvente cilíndrica. Desde la perspectiva de la ingeniería civil, este comportamiento define una condición de carga local asimétrica y severa, localizada en las zonas inferiores del tanque (donde las tensiones hidrostáticas previas de almacenamiento ya son elevadas), lo que maximiza el riesgo

de fallas catastróficas por inestabilidad.

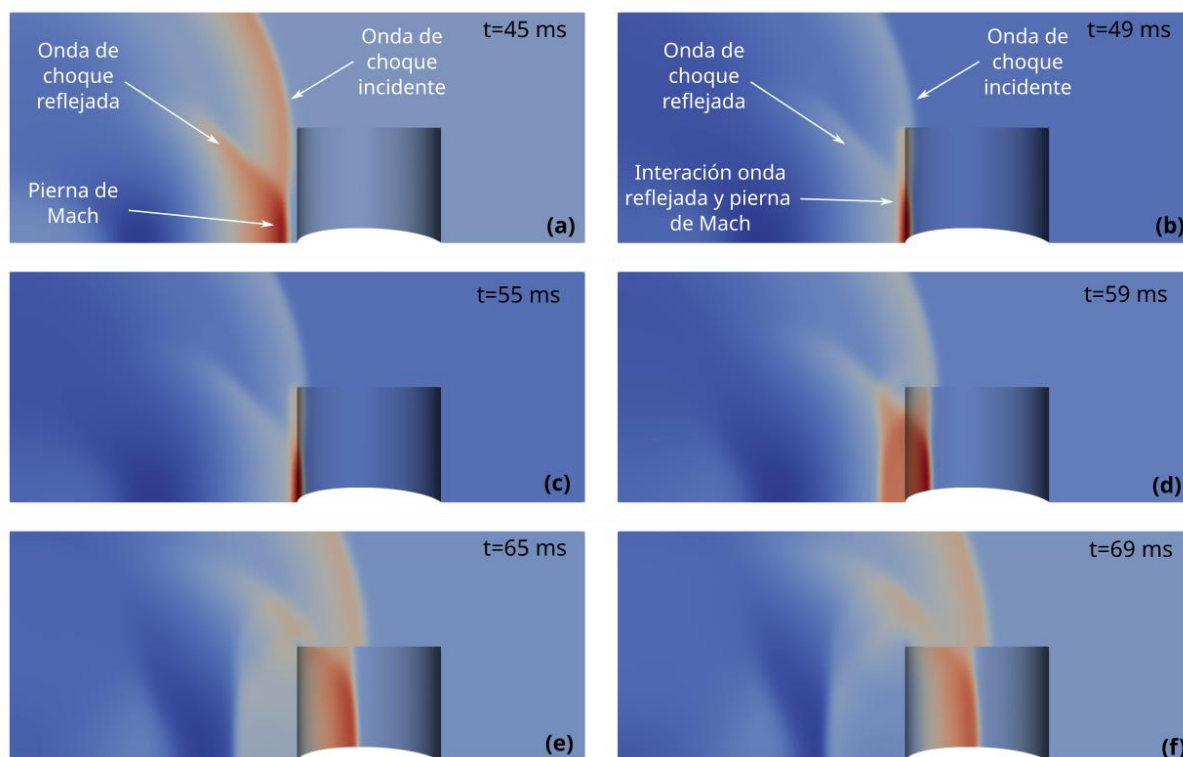


Figura 10. Contornos de presión para seis tiempos diferentes tras el contacto de la onda con el tanque para una explosión a $H=9.6m$.

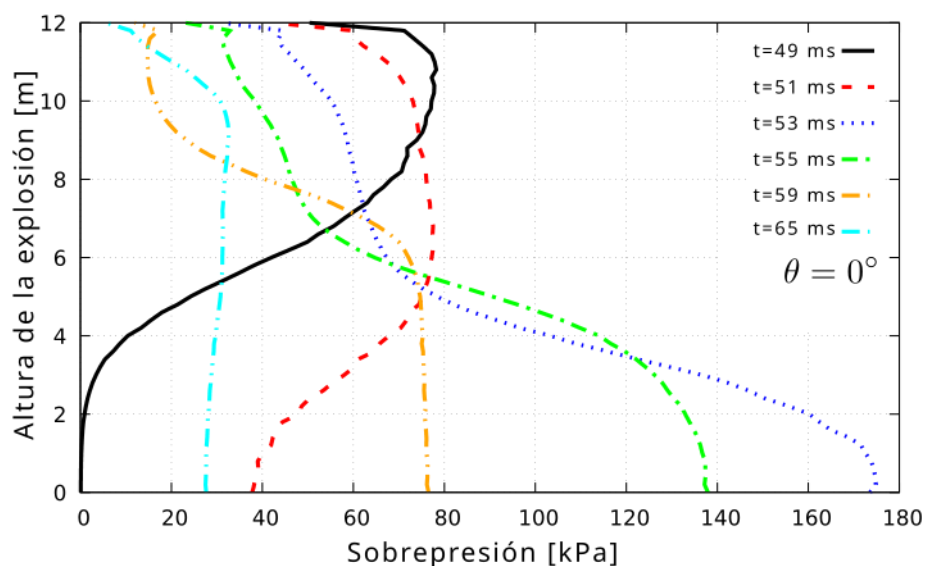


Figura 11. Distribución de sobrepresiones reflejadas al alcanzar el tanque para seis tiempos diferentes ($H=9.6m$).

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La presente investigación muestra que la cota de elevación de una fuente explosiva constituye un parámetro gobernante y crítico en la determinación de la magnitud, evolución temporal y distribución espacial de las cargas dinámicas sobre tanques de almacenamiento atmosféricos de pared delgada. Los hallazgos numéricos evidencian que el desarrollo y consolidación de la pierna de Mach altera drásticamente los patrones de sollicitación tradicionales a través de tres mecanismos físicos acoplados: la severa amplificación de las sobrepresiones e impulsos específicos en las zonas inferiores de la estructura, la inducción de un gradiente circunferencial marcadamente asimétrico con concentraciones de energía críticas en la generatriz frontal, y una elevada complejidad transitoria durante las etapas iniciales del impacto. Estos fenómenos complementan los criterios de diseño y análisis de riesgo convencionales, los cuales tienden a asumir de forma simplificada que las detonaciones superficiales o las hipótesis de presiones uniformes en la altura representan la condición más desfavorable. Por el contrario, omitir la variabilidad morfológica del frente de onda inducida por explosiones elevadas puede conducir a una subestimación peligrosa de las demandas en el tanque debido a las cargas por presión.

Desde una perspectiva metodológica, la implementación del esquema numérico de Kurganov, Noelle y Petrova (KNP) dentro del modelado de dinámica de fluidos computacional ha demostrado ser una herramienta de alta fidelidad, robusta y confiable para caracterizar las complejas interacciones transitorias onda-estructura en configuraciones industriales sin incurrir en aproximaciones empíricas excesivas. Su calibración metodológica previa proporciona un marco de análisis riguroso para la toma de decisiones en ingeniería de protección y seguridad. De cara al futuro, esta investigación define una línea orientada al desarrollo de estrategias de mitigación pasiva y al diseño de refuerzos estructurales específicos (como anillos de rigidización perimetral u optimización de espesores de chapa) focalizados en las zonas identificadas como críticas: la base cilíndrica y el frente de la envolvente. Asimismo, la metodología desarrollada sienta las bases para extender el análisis paramétrico hacia el estudio de la variabilidad en la relación geométrica altura-diámetro, configuraciones de techos alternativos y, fundamentalmente, la caracterización de la propagación de frentes de choque en granjas de tanques para evaluar y mitigar los efectos de falla en cadena (efecto dominó) en infraestructuras de almacenamiento a gran escala.

Por otra parte, la herramienta calibrada y la metodología presentada en este trabajo y

en Monaldi et al. (2026) permite no solo estudiar los efectos sobre tanques de almacenamiento, sino también sobre cualquier otra estructura que sufra el impacto de una *blast wave* originada por una gran liberación de energía, tal como ocurrió durante la explosión en el Polo Industrial de Ezeiza ocurrido en noviembre del 2025³.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por los Proyectos “Desarrollo y Aplicación de Estudios Teóricos, Numéricos y Códigos Computacionales en Mecánica de Fluidos e Intermittencia Caótica” de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNC, y PIP-2021-2023-GI “Efectos del Viento, Explosiones e Incendio en Tanques de Almacenamiento de Combustibles”. El primer autor es becario doctoral de CONICET. Se utilizaron recursos computacionales de UNC Supercómputo (CCAD), parte del SNCAD, Argentina.

Colaboradores

Se agradece también al Dr. Luis Felipe Gutierrez Marcantoni quien también formó parte de la presente investigación.

Aclaración

El presente trabajo es una versión sintética del artículo presentado en la revista [Process Safety and Environmental Protection](#), titulado “Parametric study of explosion height effects on blast loading characteristics for cylindrical storage tanks using cfd” en el año 2025 (DOI: [10.1016/j.psep.2025.107782](https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107782)).

Referencias

- Godoy, L. A., & Flores, F. G. (2002). Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks. *Structural Engineering and Mechanics*, 13(5), 533-542.
- Kletz, T., & Amyotte, P. (2019). *What went wrong?: case histories of process plant disasters and how they could have been avoided*. Butterworth-Heinemann.
- Shirbhate, P. A., & Goel, M. D. (2021). A Critical Review of Blast Wave Parameters and Approaches for Blast Load Mitigation: PA Shirbhate, MD Goel. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1713-1730.
- Monaldi, L., Marcantoni, L. F. G., & Elaskar, S. A. (2025). Parametric study of explosion

³ [Nota periodística del diario La Nación](#).

height effects on blast loading characteristics for cylindrical storage tanks using cfd. *Process Safety and Environmental Protection*, 107782.

Duong, D. H., Hanus, J. L., Bouazaoui, L., Penner, O., Moriceau, J., Prod'homme, G., & Reimeringer, M. (2012). Response of a tank under blast loading--part I: experimental characterisation of blast loading arising from a gas explosion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(9), 1023-1041.

Codina, R. H., Ambrosini, D., & de Borbón, F. (2013). Numerical study of confined explosions in urban environments. *International Journal of Protective Structures*, 4(4), 591-617.

Kurganov, A., & Tadmor, E. (2000). New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations. *Journal of computational physics*, 160(1), 241-282.

Greenshields, C. J., Weller, H. G., Gasparini, L., & Reese, J. M. (2010). Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 63(1), 1-21.

Marcantoni, L. G., Elaskar, S., Tamagno, J., Saldía, J., & Krause, G. (2021). An assessment of the OpenFOAM implementation of the KNP scheme to simulate strong explosions. *Shock Waves*, 31(2), 193-202.

Monaldi, L., Marcantoni, L. G., & Elaskar, S. (2022). OpenFOAMTM simulation of the shock wave reflection in unsteady flow. *Symmetry*, 14(10), 2048.

Monaldi, L., Marcantoni, L. G., & Elaskar, S. Validation of the KNP Scheme in OpenFOAMTM for Blast Wave Simulations: Applications to Fuel Storage Tank Safety. En: Submitted to *International Journal of Protective Structures* xx.ss (2026 - in review), pág. xxxx.

UFC-340-02. «Unified Facilities Criteria (UFC-340-02), structures to resist the effects of accidental explosions». En: Department of Defense, United State of America (2008)

Godoy, L. A., & Ameijeiras, M. P. (2023, July). Plastic buckling of oil storage tanks under blast loads. In *Structures* (Vol. 53, pp. 361-372). Elsevier.

Tauseef, S. M., Abbasi, T., Pompapathi, V., & Abbasi, S. A. (2018). Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 331-338.