

# PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE OSCILACIONES DE LÍQUIDOS EN TANQUES ACELERADOS

**Ignacio Blaksley**  
**LU 1030434**  
Ingeniería Industrial

Tutor  
**Axel Larreteguy**  
**UADE**

Co-Tutor  
**Pablo Caron**  
**UADE**

**9 de febrero 2022**



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

.....	1
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	6
<b>MODELO</b> .....	10
<b>Costo Camión Cisterna</b> .....	12
<b>HERRAMIENTA</b> .....	13
OpenFOAM: .....	13
¿Qué es CFD? .....	13
SolidWorks: .....	13
ParaView: .....	14
<b>DESARROLLO</b> .....	15
<b>SIMULACIONES</b> .....	21
<b>RESULTADOS</b> .....	23
<b>Cisterna Cilíndrica</b> .....	23
<b>Cisterna Cuadrada</b> .....	26
<b>Cisterna Ovalada</b> .....	29
<b>Pros y Contras: Geometría de la Cisterna</b> .....	32
<b>Simulación 3D</b> .....	32
<b>CONCLUSIONES</b> .....	35
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	36
<b>ANEXO A</b> .....	38
<b>Ecuaciones InterFoam</b> .....	38
<b>ANEXO B</b> .....	39
<b>Tabla de Fuerzas (PostProceso)</b> .....	39

## RESUMEN EJECUTIVO

El transporte de líquidos, especialmente de líquidos inflamables, suele ser extremadamente peligroso. Uno de los motivos, es el movimiento de los líquidos dentro del tanque en el que es transportado. Los efectos del movimiento y oscilaciones dentro del tanque pueden comprometer la estabilidad y seguridad del camión o tráiler.

A tal fin se decidió realizar un estudio con el objetivo de estudiar el comportamiento del fluido sometido a aceleraciones laterales y plantear alternativas que permitan reducir su impacto.

El estudio simula el comportamiento del fluido en la cisterna de un camión al ser sometido a una aceleración centrípeta producto que el mismo tome una curva a 90 km/h.

Debido a que actualmente los tanques vienen compartimentados en su longitud, mitigando los efectos de la aceleración y frenado del camión, se descarta el análisis de las fuerzas axiales en el tanque.

Para realizar el estudio, se utilizó la herramienta de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) tomando como base, distintas configuraciones de tanques, tanto en su geometría y barreras internas. Adicionalmente, se evaluó el efecto del llenado del tanque para dichas configuraciones.

El CFD utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos, dividiendo el espacio en pequeños volúmenes de control sobre los que se resuelve en cada uno de ellos ecuaciones de conservación. Esto permite poder analizar modelos complejos de manera económica y rápida.

Se analizaron 2 variables principales, fuerzas (Máxima fuerza horizontal al cual es sometido el tanque) y tiempo de oscilación.

Se realizaron 20 simulaciones, resultado de la combinación de 3 formas de tanque, 3 modelos de mamparas perforadas y 2 volúmenes de llenado.

Para el estudio se utilizaron 3 formas de camiones cisterna estándar, con el objetivo de contemplar las distintas configuraciones que ofrece el mercado. Dicha forma afecta al volumen máximo que pueden transportar y por lo tanto tendrá un impacto en el resultado de las fuerzas máximas.

Como conclusión se observó la importancia en la implementación de buffers o mamparas longitudinales, los cuales reducen significativamente el tiempo de oscilación del fluido dentro del tanque y reduce la fuerza máxima que debe soportar el camión durante el recorrido, siendo

despreciable la pérdida del volumen interno. La forma del tanque, si bien tiene algún impacto en la amortiguación de la oscilación del líquido, tiene una injerencia despreciable si la comparamos con el uso de las mamparas.

## **ABSTRACT**

The transport of liquids, especially flammable liquids, is often extremely dangerous. One of the reasons is the movement of the liquids inside the tank in which it is transported. The effects of movement and oscillations within the tank can compromise the stability and safety of the truck or trailer.

To this end, it was decided to carry out a study in order to analyze the behavior of the fluid subjected to lateral accelerations and propose alternatives that allow reducing its impact.

The study simulates the behavior of the fluid in the tank of a truck when is subjected to a centripetal acceleration as a result of the fact that it takes a curve at 90 km / h.

Since the tanks are currently compartmentalized in their length, mitigating the effects of the acceleration and braking of the truck, the analysis of the axial forces in the tank is ruled out.

To carry out the study, it was used CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation tool, using different tank configurations, both in their geometry and internal barriers. Additionally, it was studied the effect of tank filling for these configurations.

CFD uses numerical methods and algorithms to solve and analyze fluid flow problems, dividing the space into small control volumes on which conservation equations are solved in each of them. This allows complex models to be analyzed cheaply and quickly.

Two main variables were analyzed: forces (Maximum horizontal force to which the tank is subjected) and oscillation time.

20 simulations were carried out, resulting from the combination of 3 tank shapes, 3 perforated bulkhead models and 2 filling volumes.

For the study, 3 shapes of standard tanker trucks were used, in order to include the different truck configurations offered by the market. This shape affects the maximum volume that they can carry and therefore will have an impact on the result of the maximum forces.

In conclusion, it was observed the advantage of using perforated bulkheads, which significantly reduce the oscillation time of the fluid inside the tank and reduce the maximum force that the truck must withstand during the journey, the loss of internal volume due to the use of bulkhead

is despicable. The shape of the tank, although it has some impact on the damping of the liquid oscillation, has a despicable interference if we compare it with the use of bulkheads.

## ESTADO DEL ARTE

Las oscilaciones de fluidos dentro de los tanques son un fenómeno que se vienen estudiando hace ya varios años en todo el mundo, ya que tiene aplicaciones generalizadas en muchas industrias, incluida la automotriz, aeroespacial y naval (ver por ejemplo [ref. 7, ref. 9, ref. 11]). En los camiones cisterna parcialmente llenos, estas fuerzas y momentos se combinan con la dinámica del vehículo para ilustrar la respuesta direccional y la estabilidad de los vehículos pesados bajo una aceleración externa: cambios abruptos en la velocidad (frenado), cambios bruscos de dirección (cambio de carril o tomando una curva), o movimientos repetitivos que puedan generar oscilaciones por resonancia. Debido a su impacto en la seguridad vial, los más comunes que se pueden encontrar son los estudios del impacto del movimiento del líquido dentro de la cisterna al intentar frenar un camión en movimiento.

Estas oscilaciones, se podrían definir como cargas dinámicas que tienen impacto sobre la estructura de una cisterna como resultado del movimiento de un fluido con superficie libre confinado dentro de un tanque (Tanque parcialmente lleno).

Estos estudios son de suma importancia hoy en día para seguir optimizando los medios de transporte y mejorar a la seguridad vial. Sacando algunos casos particulares, prácticamente todos los camiones de transporte de líquidos en circulación separan las cisternas por medio de algún tipo de mamparas, en varios compartimientos ya sea separados (Petróleo, Naftas, Gasolinas, etc.) o interconectados entre sí (GLP).

Básicamente, los estudios sobre oscilaciones de líquidos en cisternas de transporte que involucran modelos de oscilaciones de líquidos y modelos de vehículos se pueden realizar mediante los tres métodos:

- Método Cuasi-estático
- Método de Analogía Mecánica
- Método Dinámico

Si bien estos métodos son una buena aproximación de la realidad, se suelen combinar con métodos experimentales de dichos estudios para validar los métodos computacionales.

Los modelos cuasi-estáticos [ref. 6], son métodos convencionales para la predicción de la posición estable de una superficie libre de un líquido en una cisterna en movimiento. En este método se especifica la ubicación del centro de masa del líquido bajo diferentes aceleraciones. Se suele remplazar la superficie plana del líquido por una línea recta asumiendo que el fluido es homogéneo e incompresible durante la aceleración. La Figura 1 muestra la posición de la superficie libre del fluido en el balanceo de un camión cisterna parcialmente lleno tomando una curva.

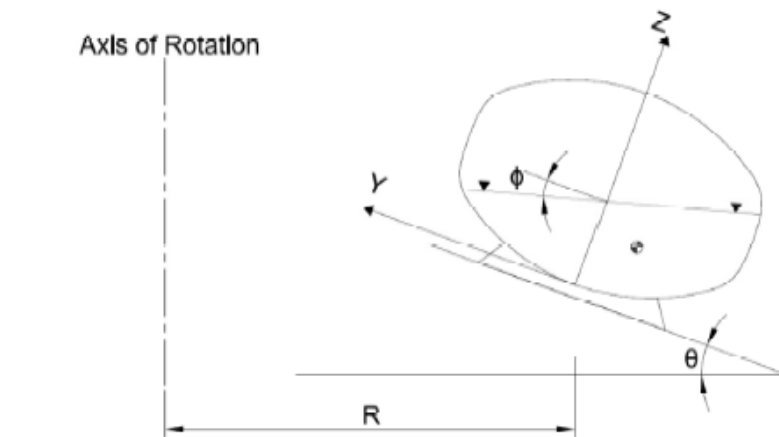


Figura 1: Modelo de plano de balance en estado estacionario.

Otra aplicación importante del método cuasi-estático es la optimización de los parámetros de diseño de los vehículos cisterna para mejorar la estabilidad. Ning Kang [ref. 6] utilizó este método para encontrar una geometría del tanque óptima basado en la minimización de cargas laterales y verticales en el centro de gravedad del líquido.

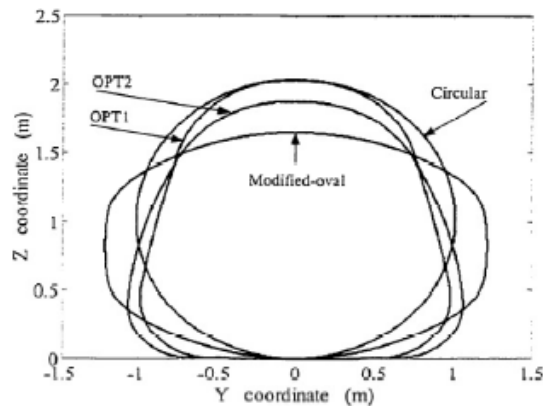


Figura 2: Secciones transversales de los tanques óptimos propuestos por Kang.

En los métodos de Analogía Mecánica [ref. 6], por su parte, el líquido dentro del recipiente puede tratarse como si constara de dos partes distintas: la parte estacionaria con respecto al contenedor y la parte móvil, provocado por la oscilación del líquido. La parte móvil del líquido está modelada por una serie de sistemas de masa-resorte o un conjunto de péndulos simples que asumen un movimiento lineal del líquido. Los parámetros del sistema mecánico equivalente se pueden evaluar considerando la masa equivalente y los momentos de inercia, la conservación del centro de gravedad del líquido y las frecuencias de oscilación equivalentes, las fuerzas y los momentos resultantes.

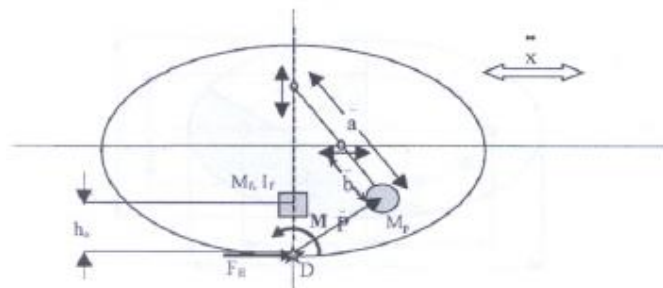


Figura 3: Modelo de analogía mecánica con péndulo.

Finalmente, en los métodos Dinámicos [ref. 6], los cuales vamos a utilizar en este estudio, el movimiento del líquido se representa resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes. Para bajas amplitudes de movimiento, se puede utilizar un enfoque lineal, asumiendo un líquido ideal que no tiene viscosidad y se simplifican las ecuaciones de Navier-Stokes. Para el caso donde las amplitudes de movimiento son mayores, como en nuestro caso, las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven utilizando métodos computacionales (CFD) [ref. 4, ref. 9].

Si bien en estos estudios se suelen tomar modelos de camiones con varios grados de libertad, y se combinan con los modelos CFD para evaluar el comportamiento del vehículo en distintas maniobras y para distintas velocidades y volúmenes de llenado, en este trabajo nos vamos a focalizar únicamente en las simulaciones CFD que son necesarios como fuente de datos para realizar estos análisis, calculando las fuerzas resultantes producto de aplicar una aceleración a distintos modelos de cisternas y diferentes volúmenes de llenado.



En las simulaciones CFD, solo se aplican fuerzas a un volumen o geometría determinado, y se calculan para un intervalo de tiempo determinado las fuerzas resultantes por la interacción entre el líquido en movimiento y las cisternas.

Como se puede observar en un estudio del 2010 realizado por la Universidad de Stuttgart en Alemania [ref. 9], donde se estudió el efecto del movimiento del líquido en frenado de un camión para una cisterna sin compartimentar, respecto de un camión con la cisterna dividida en 3 compartimientos individuales, pero el total del volumen transportado es el mismo.

En dicho estudio se planteó un camión con 17 grados de libertad como se muestra en la Figura 4, se realizaron las simulaciones CFD correspondientes para estudiar cada caso y utilizando los resultados obtenidos en las simulaciones en el modelo de camión, se pudo calcular el impacto en el tiempo de frenado para cada modelo.

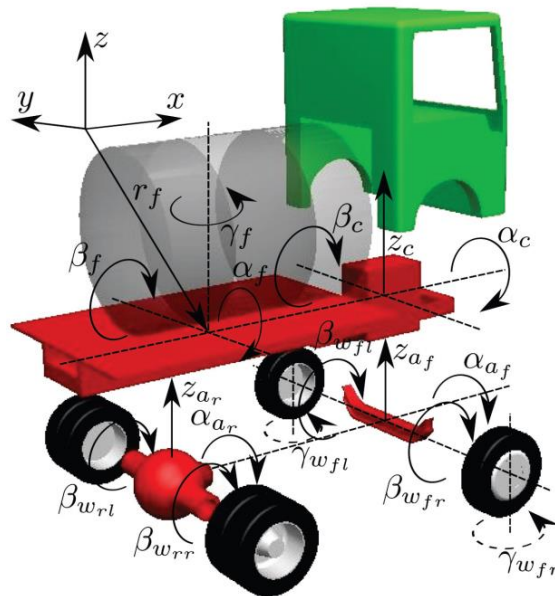


Figura 4: Modelo de camión con 17 grados de libertad.

Para nuestro estudio en lugar del efecto del frenado del camión, se va a estudiar el efecto de una aceleración lateral producida por el camión al tomar una curva como se va a detallar más adelante.

## MODELO

En Argentina y el resto del mundo, la mayoría de los combustibles líquidos se transportan por camión desde las Refinerías hasta las bocas de expendio donde llegan al consumidor final. Argentina en los últimos años produce un promedio de 22MM Tn de combustibles líquidos de consumo masivo al año (Naftas, Gasoil, GLP, JetKero) [ref. 5], y en su mayoría es transportado en camiones cisterna por las rutas de todo el país. El transporte de estos líquidos no solo es peligroso por su inflamabilidad, sino que, al ser un líquido, puede generar problemas de estabilidad por los movimientos producidos en el transporte.

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento del líquido dentro de las cisternas al ser sometido a una aceleración lateral producido por el camión al tomar una curva a una velocidad constante. Para el caso puntual de este estudio hemos tomado para el análisis una curva horizontal sin peralte de unos 150m de Radio y una velocidad de 90km/h constante, simulando un camión doblando en una ruta o autopista.

Para la validez de dicho análisis, se analizaron las 3 formas de cisternas más utilizadas en el mercado argentino para el transporte de líquidos, las cuales se muestran a continuación:

Cisternas:

Sección Cuadrada

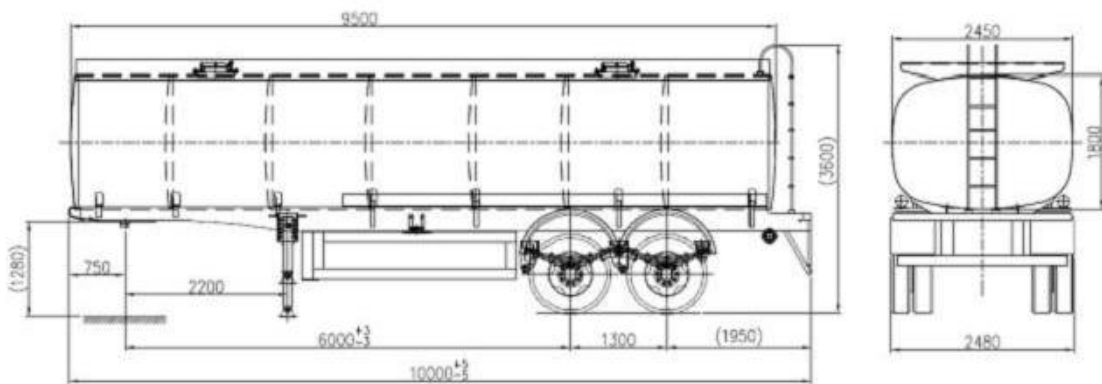


Figura 5: Vista lateral de una Cisterna y Cisterna de Sección Cuadra.

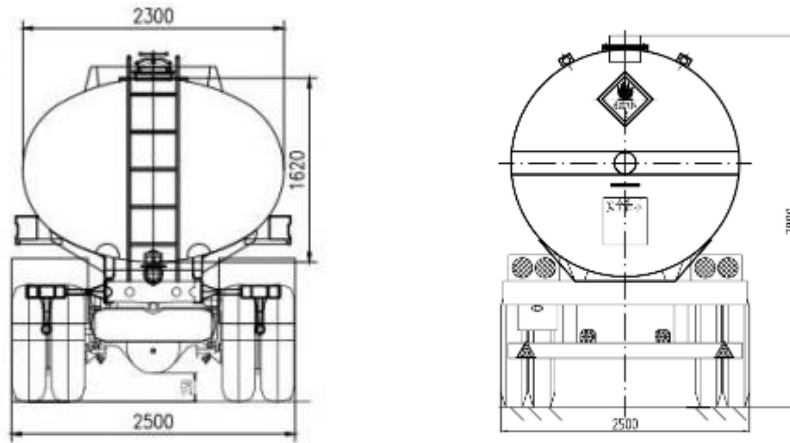


Figura 6: Cisterna Sección Ovalada (Izquierda) y Cisterna Sección Cilíndrica (Derecha).



Figura 7: Ejemplos de Camiones cisterna actualmente utilizados en argentina por la empresa YPF.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo del estudio es analizar la oscilación del fluido dentro de la cisterna al ser sometido a una aceleración horizontal, y evaluar alternativas que disminuyan el impacto de estas oscilaciones, se asume que todos los fluidos de baja viscosidad se comportan de forma similar y, por lo tanto, con el fin de simplificar el modelado, todas las simulaciones se parametrizaron tomando Agua como fluido de estudio. Los cálculos se realizaron simulando una aceleración horizontal en forma progresiva hasta una aceleración máxima de  $4,16 \text{ m/s}^2$  durante unos segundos y luego se disminuyó hasta dejar en reposo el sistema, observando durante varios segundos la oscilación del fluido, calculando, el tiempo de oscilación y fuerzas máximas soportados por la cisterna.

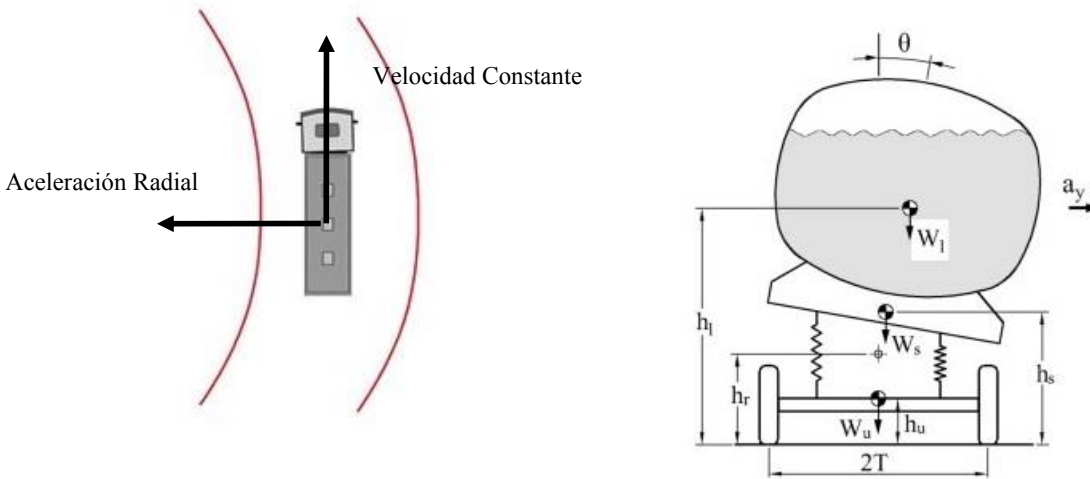


Figura 8: Diagrama esquemático del camión tomando una curva.

### Costo Camión Cisterna

Adicional a las simulaciones que se realizarán en este estudio, debemos tener presente el costo que implica adicionar mamparas rompeolas longitudinales dentro de la cisterna.

A continuación, se detalla cómo se conforma el costo aproximado de un camión cisterna.

Descripción	Precio aproximado
Tractor para Cisterna de 42.000 litros y 3 ejes	USD 150.000
Semirremolque Cisterna de 42.000 litros y 3 ejes	USD 100.000 / USD 120.000
Compartimentado Cisterna: Incluido válvulas, tapas y bocas de carga y descarga y demás accesorios para 5 compartimiento	USD 10.000 / USD 15.000

\*Todos los precios incluyen IVA del 10,5%

Fuente: Consulta Telefónica a IVECO Argentina octubre 2021

Sin embargo, como actualmente en el mercado no está implementado este tipo de mamparas propuestas para aceleraciones laterales, no tenemos una referencia de precios precisa.

Se puede considerar que si el compartimentado de una cisterna está en el orden del 10% a 15% del valor de la cisterna (incluyendo todos los insumos necesarios para cada compartimento), el costo de incluir las mamparas longitudinales se podría estimar cerca del 5% del valor de la cisterna. Por lo que no sería un costo significativo dentro de la inversión si se considera que podría mejorar la seguridad en el transporte.

## HERRAMIENTA

OpenFOAM:

Para las simulaciones de este estudio se utilizó el software OpenFOAM [ref. 2], el cual es un Software CFD (Computational Fluid Dynamics) de código abierto y gratuito desarrollado por la empresa OpenFoam Ltd. y distribuido por la Fundación OpenFoam. Este software permite la resolución de problemas complejos de flujos de fluidos que involucran desde reacciones químicas, turbulencias y transferencia de calor, hasta acústica, mecánica de sólidos y electromagnética.

¿Qué es CFD?

La dinámica de fluidos se ocupa del movimiento de los fluidos (líquidos y gases) y las fuerzas que ejercen sobre ellos. "Computacional" se refiere al cálculo del flujo y las fuerzas mediante análisis numérico. Por lo tanto, una definición literal de "dinámica de fluidos computacional" podría ser "la predicción del movimiento y las fuerzas de los fluidos mediante cálculos, utilizando análisis numérico". [ref. 1]

CFD usa métodos numéricos que representan cada Ecuación Diferencial Parcial como un conjunto de ecuaciones algebraicas en puntos discretos en el dominio de la solución; las ecuaciones algebraicas se resuelven mediante la inclusión de condiciones de contorno adecuadas. El método de volumen finito es un método numérico popular que subdivide el dominio de la solución en una malla de pequeños volúmenes o celdas. Cada celda incluye valores discretos, por ejemplo, para la velocidad, típicamente en su centro. El sistema de ecuaciones lineales produce una matriz dispersa que generalmente se resuelve mediante métodos iterativos. El método de volumen finito es popular porque se presta a la solución iterativa de conjuntos complejos de ecuaciones y al cálculo paralelo por descomposición de dominios.

SolidWorks:

Software de diseño 3D para dibujar los distintos modelos de cisternas que se utilizaran en las simulaciones. [ref. 12]

ParaView:

Software para la visualización gráfica de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas realizadas en OpenFOAM. [ref. 13]

## DESARROLLO

Se utilizó SolidWorks para modelar un corte de 10cm de cada uno de los modelos de cisterna y las distintas alternativas de mampara que se analizaron en este estudio. Se utiliza una herramienta del OpenFOAM diseñada para estructurar la malla de celdas y así armar la malla de cada uno de los modelos, sobre las cuales se realizarán los cálculos numéricos.

Para definir el tamaño de celda adecuado en cada maya, se realizaron pruebas con distintos tamaños de celda, para así evaluar el tamaño óptimo para realizar las simulaciones.

Para nuestro estudio es importante tener una buena definición en los cálculos de la capa límite entre el fluido y el aire, y también una buena definición en la interacción entre el fluido y las paredes.

Como se puede observar en los 2 primeros tamaños de celda propuestos, si bien hay menos celdas sobre las que se realizan los cálculos y por lo tanto la simulación es más rápida, la capa límite, representada en color blanco, es muy grande y, por lo tanto, los resultados obtenidos no tienen precisión.

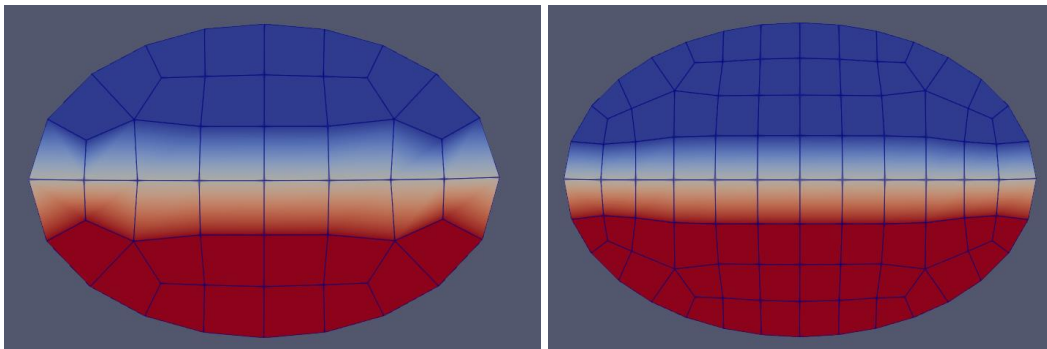


Figura 9: Mayas con celdas de aprox. 30cm<sup>3</sup> y 20 cm<sup>3</sup>.

A medida que achicamos el tamaño de celda, y refinamos las celdas que están en contacto con las paredes de la cisterna, obtenemos resultados más precisos ya que se realizan los cálculos sobre volúmenes de estudio más chicos, lo que se traduce en mayor cantidad de cálculos para el volumen total de la cisterna.

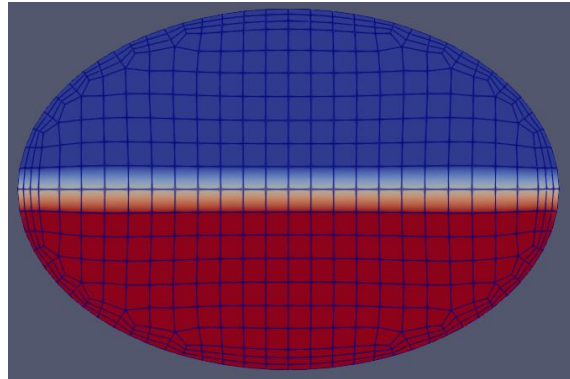


Figura 10: Maya con celda de aprox. 10cm<sup>3</sup>.

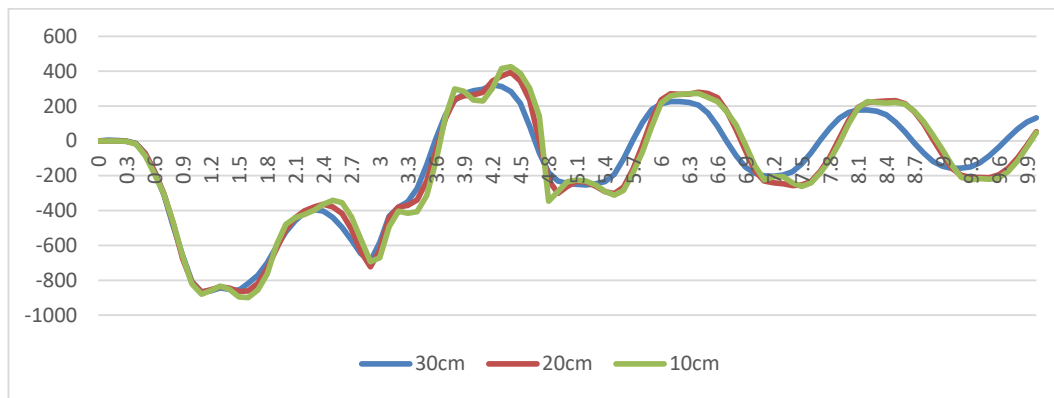


Gráfico 1: Resultados fuerza en eje x para distintos tamaños de celdas propuestos.

Como se observa en el Gráfico 1, si bien los resultados son similares, con tamaños de celdas más grandes, las curvas se suavizan más, perdiendo información que podría ser de suma importancia a la hora de realizar el estudio.

Luego de realizar distintas pruebas, se llegó a la conclusión que el tamaño de celda óptimo para realizar las simulaciones es de 0,25 cm<sup>3</sup>. Como bien se dijo anteriormente, con el objetivo de tener mayor resolución en los cálculos de la simulación, cerca de los bordes interiores donde hay contacto entre el fluido y una pared, se utilizó una malla más refinada.

En la Figura 11 se observa la diferencia entre las celdas internas y la malla refinada de la pared. Una vez obtenidas las mallas para cada uno de los casos de estudio, se parametrizó el fluido interno de cada cisterna utilizando una librería propia del OpenFOAM con las propiedades físicas del Agua.



Cada modelo se simuló con una carga parcial de la cisterna al 50% y al 85% (85% es el máximo porcentaje de llenado que se suele utilizar para un camión cisterna por cuestiones de seguridad).

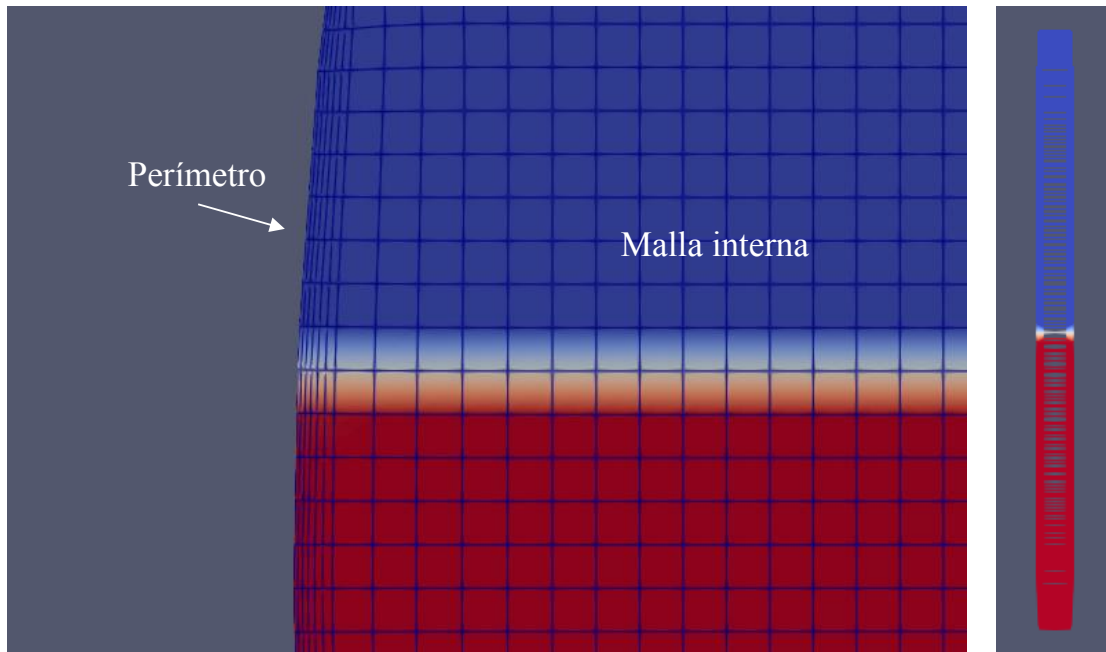


Figura 11: Sección con vista de frente y lateral correspondiente a la maya de la cisterna de sección cuadrada.

Para el fluido se utilizó la condición de fracción de fase inicial  $\alpha_{Water}$  en el que se les asigna a las celdas de la malla con Agua el valor 1 y a las celdas que contienen Aire el valor 0.

Propiedades de los fluidos utilizados en las simulaciones:

Agua:

Viscosidad Cinemática	$m^2s^{-1}$	nu	$1.0 \times 10^{-6}$
Densidad	$Kgm^{-3}$	rho	$1.0 \times 10^{-3}$

Aire:

Viscosidad Cinemática	$m^2s^{-1}$	nu	$1.48 \times 10^{-5}$
Densidad	$Kgm^{-3}$	rho	1.0

Interfaz Aire-Agua:

Tensión Superficial	Nm <sup>-1</sup>	sigma	0,07
---------------------	------------------	-------	------

La aceleración de la gravedad es uniforme y constante en todo el dominio con un valor de 9,81 m/s<sup>2</sup> hacia abajo en el eje y.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de los 3 tipos de cisternas, donde en color rojo está representada la fase Agua, en azul el Aire y la línea blanca representa la interfaz Aire-Agua, donde la celda toma valores  $\alpha_{Water}$  entre 0 y 1 para calcular el porcentaje de Agua y Aire que hay en dicha interfaz y así poder hacer los cálculos correspondientes.

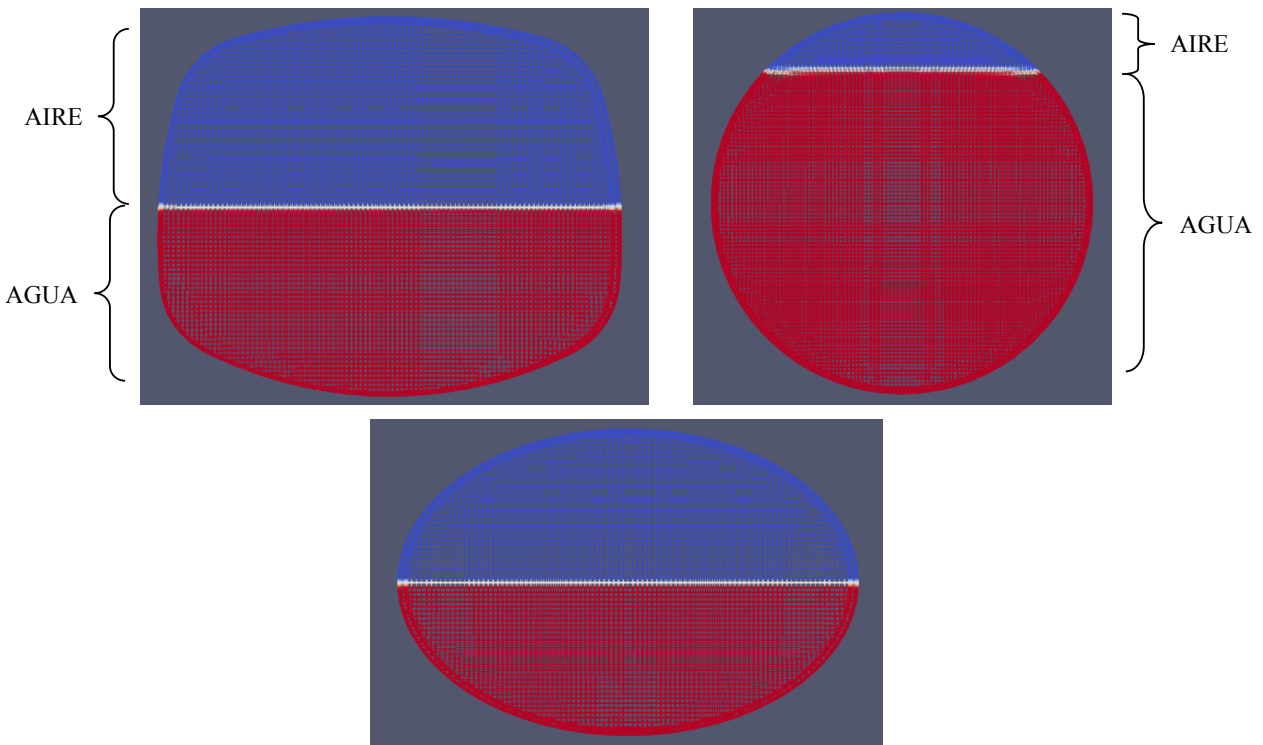


Figura 12: Cisterna de sección cuadrada llenada al 50% (Arriba Izquierda), Cisterna de sección cilíndrica llenada al 85% (Arriba derecha) y Cisterna de sección ovalada llenada al 50% (abajo).

Para parametrizar la aceleración horizontal máxima ejercida sobre la cisterna, se calculó la aceleración radial que surge de tomar una curva de 150 m de Radio a una velocidad de 90km/h.

$$A_{cr} = \frac{v^2}{R} \tag{1}$$

Donde:  $A_{cr}$  = Aceleración Radial

$$v = 90\text{km/h} = 25\text{m/s}$$

$$R = 150\text{m}$$

Obtenemos una aceleración radial máxima  $A_{cr} = 4,16 \text{ m/s}^2$

Esta aceleración se aplica durante 3 segundos y luego se deja el sistema en reposo para observar el comportamiento del fluido dentro de la cisterna. Para poder simular el modelo, se debe conocer la magnitud de la aceleración en función del tiempo, por lo que se modela una curva de aceleración que es la que luego se va a utilizar como referencia para cada simulación. Como en la realidad la aceleración no es instantánea, sino que es progresiva a medida que se ingresa y sale de la curva, se elabora una ecuación para representar dicha aceleración.

$$A_{cx} = \frac{A_{cr}}{2} * \left( \tanh\left(\frac{t-0,5}{0,1}\right) + 1 \right) - \frac{A_{cr}}{2} * \left( \tanh\left(\frac{t-3}{0,1}\right) + 1 \right) \quad (2)$$

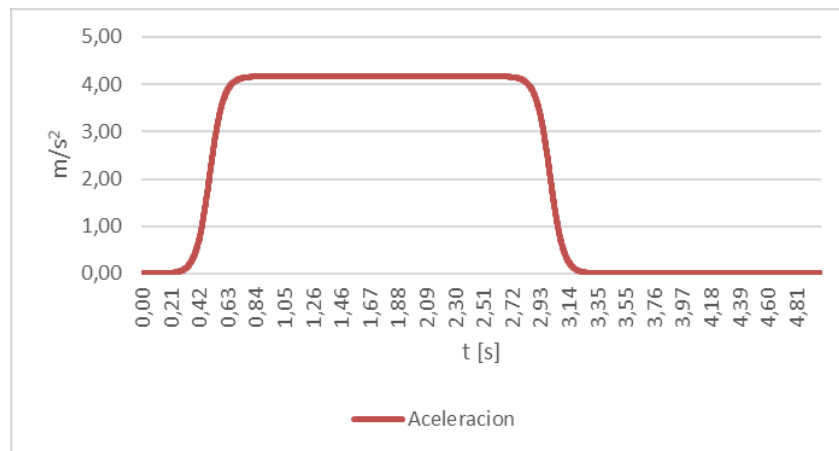


Gráfico 2: Representación gráfica de la aceleración aplicada a la cisterna en función del tiempo.

OpenFOAM ofrece distintos tipos de Solvers de simulación en función de la necesidad de cada uno. Para nuestro caso se utilizó el Solver InterFoam, el cual está desarrollado para interfaces de 2 fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles utilizando lo que se conoce como VOF (Volumen de Fluido), el cual tiene un enfoque de captura de interfaz basado en fracción de Fase (en nuestro caso  $\alpha$ Water). [ref. 2, ref. 4]

InterFoam utiliza las ecuaciones de Navier Stokes, por lo tanto, las propiedades del material son constantes en las celdas que contienen solo Agua o Aire, pero no donde hay interfaz Aire-Agua [Ver Anexo A].

## SIMULACIONES

Incluyendo los casos Base, se realizaron un total de 21 simulaciones distintas. Ejecutar cada simulación, con el poder de cómputo con el que cuento, llevó un tiempo de procesamiento de aproximadamente 3 horas por modelo. Por tal motivo, se limitó la cantidad de simulaciones a realizar. Para cada uno de los 3 tipos de cisternas propuestos, se probaron 2 tipos de mamparas distintas. El primero con una mampara hueca que llega solo hasta la mitad de la cisterna (en adelante referido como “MA”) y el otro, una mampara hueca que llega hasta el techo de la cisterna (en adelante referido como “MB”). Solo para la cisterna cilíndrica se realizó un tercer caso con 3 deflectores separados a 120° en las paredes de la cisterna (en adelante referido como “MC”). En todos los casos se simuló con la cisterna llena al 50% y al 85%.

Algunos ejemplos de las mamparas propuestas son:

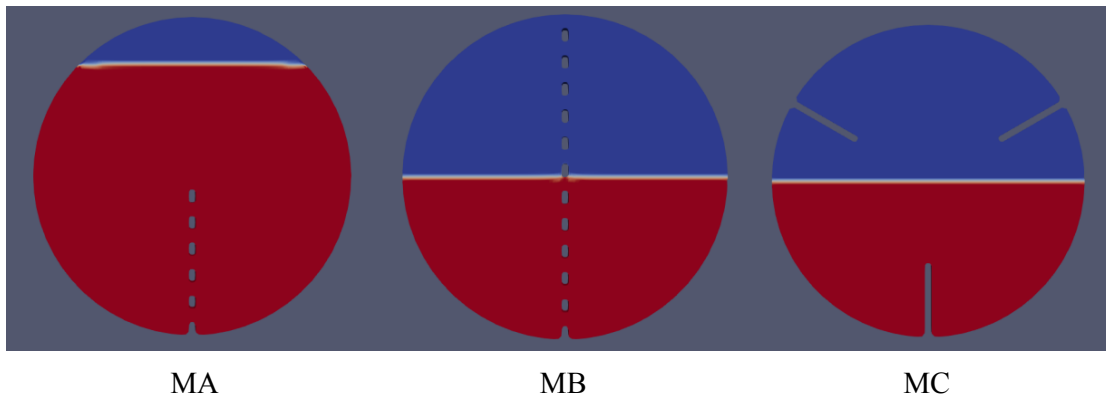


Figura: 9: Diagrama de la Cisterna Cilíndrica con los 3 modelos de mamparas propuestos.

Si bien, solo se aplica la aceleración horizontal en los primeros 3 segundos, cada simulación se realizó por un tiempo total de 20 segundos para observar el comportamiento de las oscilaciones del líquido dentro del tanque luego que se dejó de aplicar la aceleración.

Todas las simulaciones se compararon contra el caso base, que es la cisterna sin ningún tipo de mampara interna (“Caso Base”). De esta forma podemos tener una referencia sobre la cual comparar.

Debemos tener en cuenta que, si bien al incluir una mampara interna el volumen de líquido dentro de la cisterna se ve reducido, la reducción de volumen es despreciable respecto del volumen total de la cisterna.

Por otro lado, si bien no es el foco de este estudio, analizar la eficiencia en la forma de los tanques, las distintas geometrías de las cisternas permiten cargar distintos volúmenes a igual porcentaje de carga y, por lo tanto, no se puede hacer una comparación cuantitativa entre estos, ya que las fuerzas resultantes se van a ver afectadas por el volumen total que cada cisterna puede cargar.

En todas las simulaciones se corrió una instancia de cálculo de postproceso, en la que se calculó la magnitud de las fuerzas ejercidas por el fluido en los distintos ejes de coordenadas.

### Modelo 3D

Por último, luego de evaluar todos los casos, se seleccionó uno de los casos para realizar una última simulación, pero en esta oportunidad se realizó una simulación en 3 dimensiones, y en lugar de solo aplicar una fuerza lateral producto de tomar una curva, también se le aplicó una fuerza longitudinal como se muestra en el Gráfico 3 en color azul, representando que el camión disminuye la velocidad antes de tomar dicha curva.

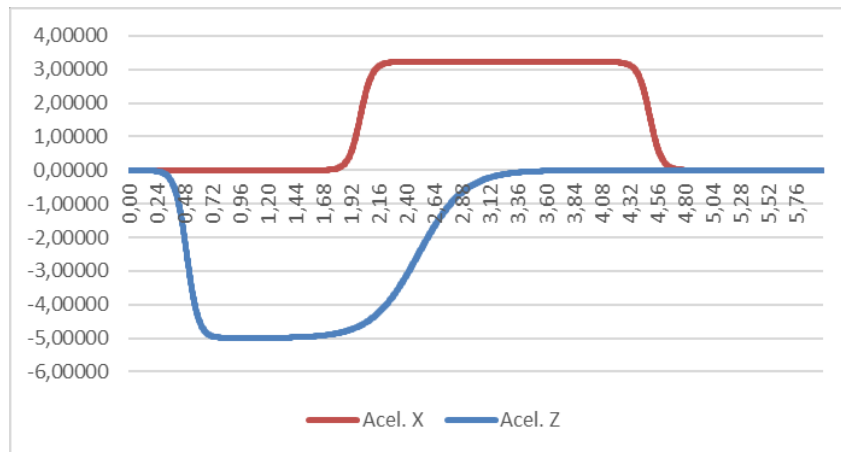


Gráfico 3: Representación gráfica de las aceleraciones aplicada a la cisterna en función del tiempo del modelo 3D.

## RESULTADOS

### Cisterna Cilíndrica

Como se puede observar, en el Gráfico 4, al estar con la cisterna a media carga, el uso de cualquiera de las mamparas propuestas tiene un impacto significativo en la amortiguación de las fuerzas producto de la oscilación del líquido. Esto se debe principalmente a que, al chocar y pasar el líquido por la mampara, la onda pierde energía reduciendo su amplitud y por lo tanto su fuerza.

Por otro lado, si bien no es significativo, se observa una pequeña reducción en la frecuencia de la onda. Como solo tenemos líquido hasta la mitad de la cisterna, no hay una diferencia significativa entre tener media mampara a tener una mampara completa.

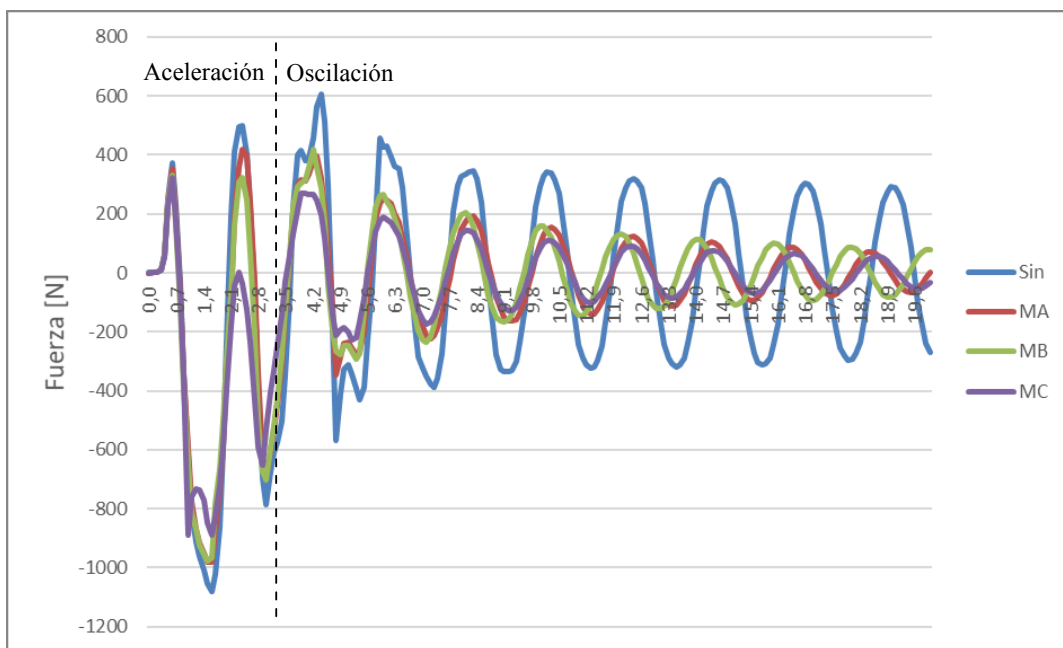


Gráfico 4: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 50%.

En el caso de tener la cisterna llena al 85%, no se observa una diferencia sustancial entre el uso de la mampara MA y MB respecto a no utilizarla, pero si hay una diferencia con la mampara MC.

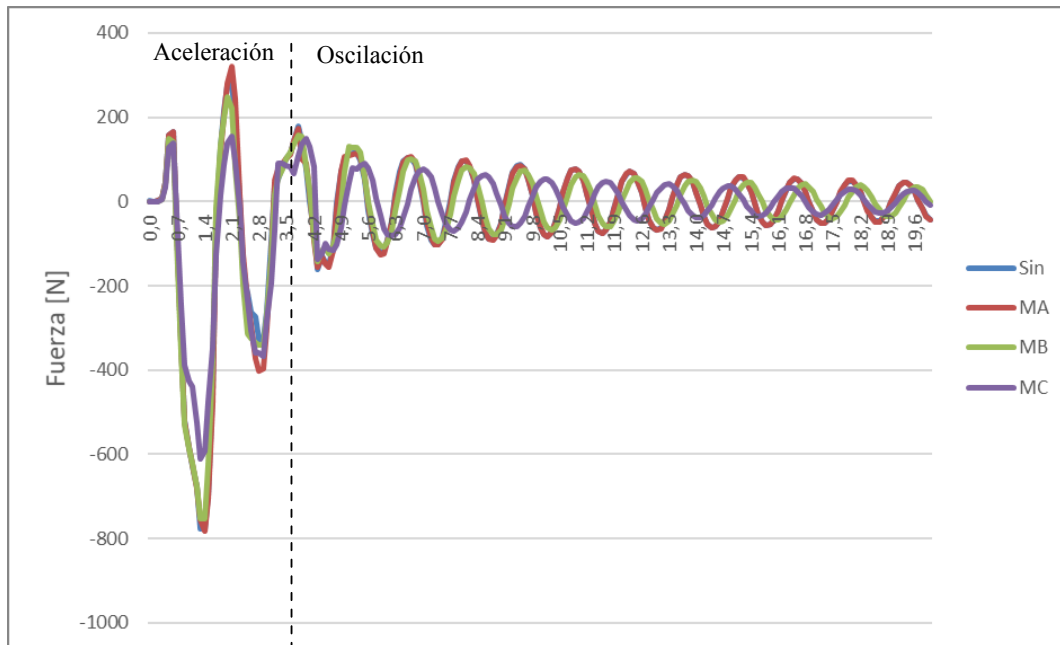


Gráfico 5: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 85%.

Las fuerzas máximas ejercidas sobre las cisternas casi no tienen diferencia con el uso o no de la mampara. Sin embargo, se puede observar que con la mampara MC, hay una reducción en la amplitud y frecuencia de oscilación y una reducción en el pico máximo de fuerza durante el tiempo en el que es aplicada la aceleración.

En la Figura 13 a continuación, se observa como la mampara MA reduce significativamente el volumen o tamaño de la onda que oscila dentro del tanque. En las imágenes de más abajo, se observa como en el caso sin ningún tipo de mampara, el fluido llega hasta el techo, mientras que en el caso con mampara MA la onda rompe más abajo.



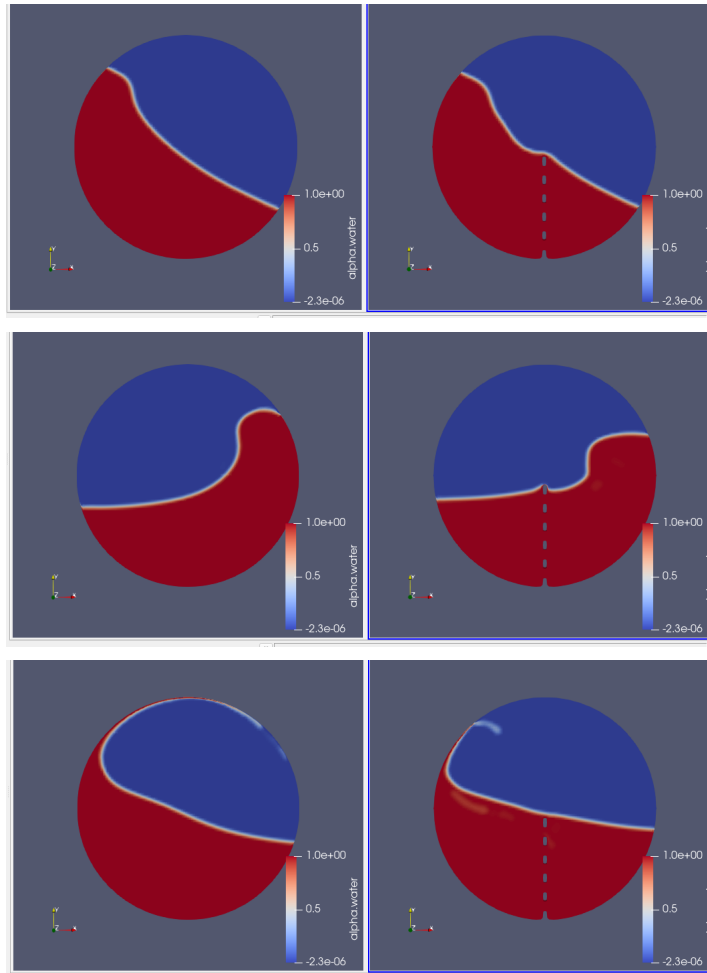


Figura 13: Comparación de las oscilaciones entre Caso Base y MA con cisterna al 50%.

Diferencia entre mampara A y B:

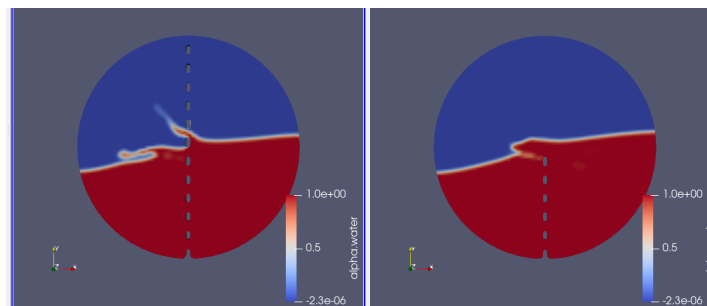


Figura 14: Comparación MA vs MB al romper la onda con cisterna al 50%.

En la Figura 14 se puede observar que la mampara MA, al no quedar por arriba del nivel máximo del fluido, la onda no sufre tanta perturbación en la superficie.

Por otro lado, con la mampara MC se observa que hay un volumen fijo debajo de la mampara superior derecha que se mantiene con líquido respecto del Caso Base.

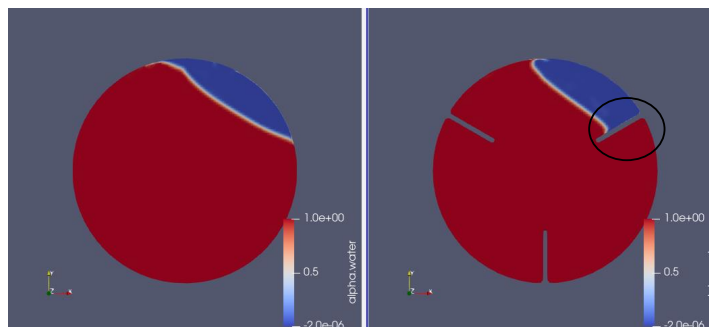


Figura 15: Caso Base vs MC para una cisterna cilíndrica al 85%.

Finalmente, comparando las curvas de los Gráficos 4 y 5, se observa que, aunque la cisterna al 85% lleva un volumen mayor de líquido, las fuerzas y oscilaciones resultantes dentro del tanque producto de la aceleración son menores a las de la cisterna cargada al 50%, demostrando el riesgo en la seguridad de transportar la cisterna parcialmente vacía.

### **Cisterna Cuadrada**

En el caso de la cisterna cuadrada, con el uso de la mampara se muestra un efecto muy distinto al de la cisterna cilíndrica. Con la mampara cuadrada se genera un pico de fuerza mayor al Caso Base al momento de aplicarse la aceleración, pero genera una importante reducción en la oscilación una vez se deja de aplicar la aceleración.

Como se observa en el Gráfico 6, para el Caso Base las paredes casi verticales en los laterales de la cisterna no generan ningún tipo de resistencia que reduzcan la fuerza de la onda, por lo que la amplitud de la onda dentro del tanque casi no varía y la oscilación continúa indefinidamente.

Al incluir en las simulaciones las mamparas MA o MB, se observa una reducción en la fuerza de oscilación de más del 50% de forma casi inmediata, llegando a valores muy chicos en un muy corto periodo de tiempo.

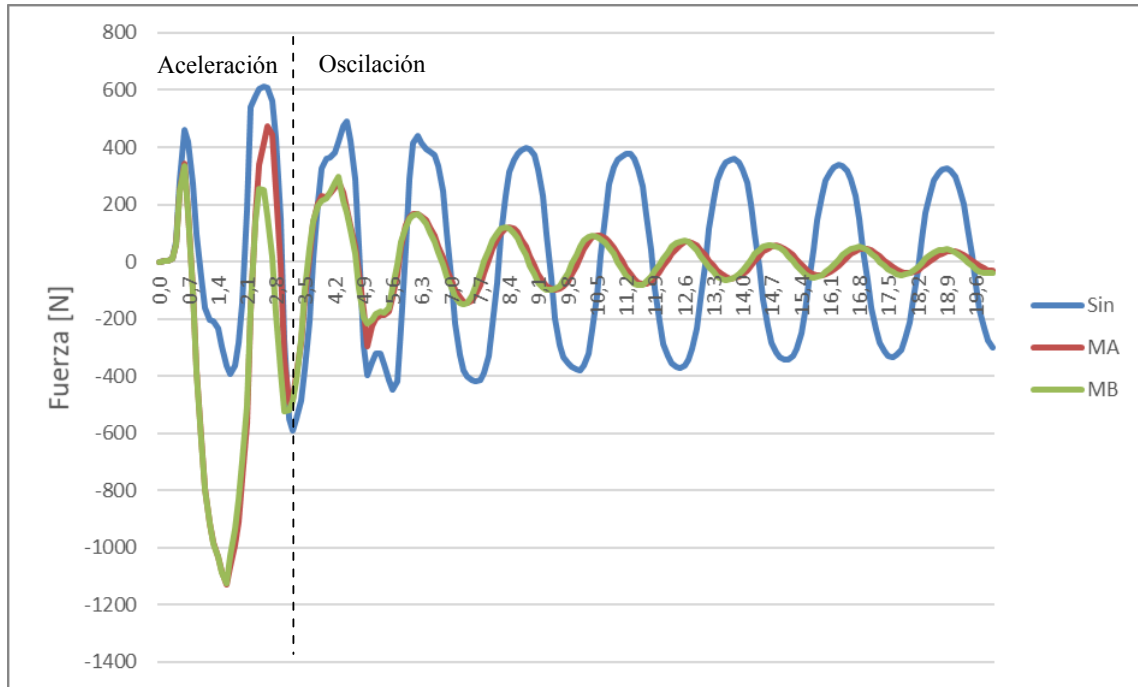


Gráfico 6: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 50%.

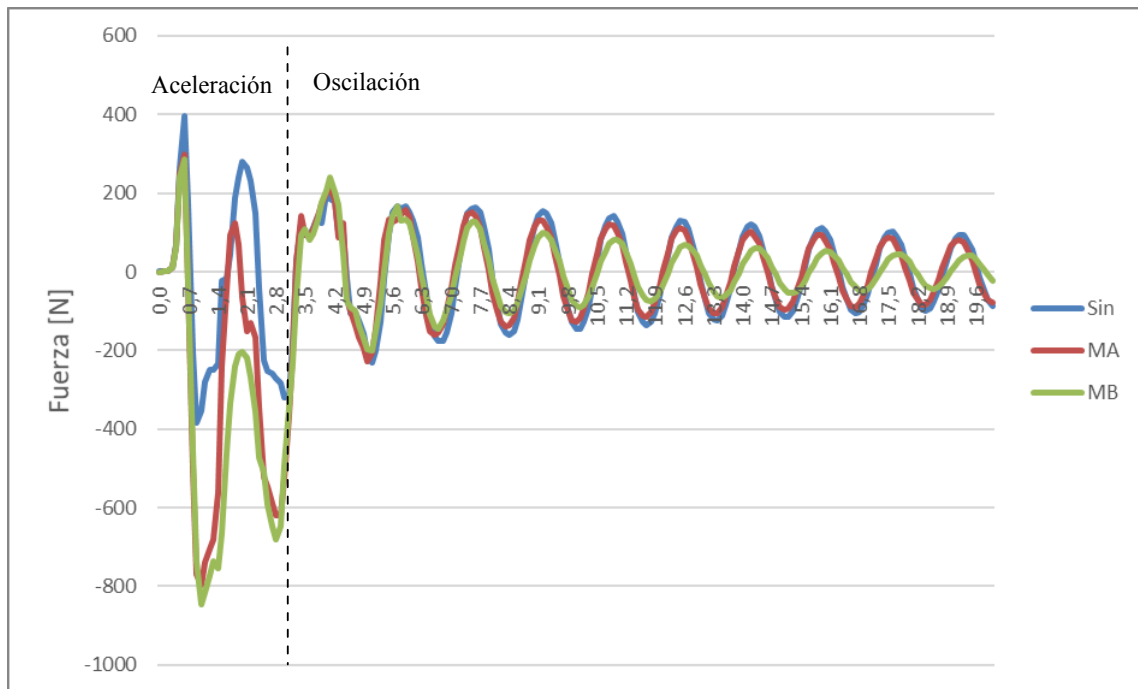


Gráfico 7: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 85%.

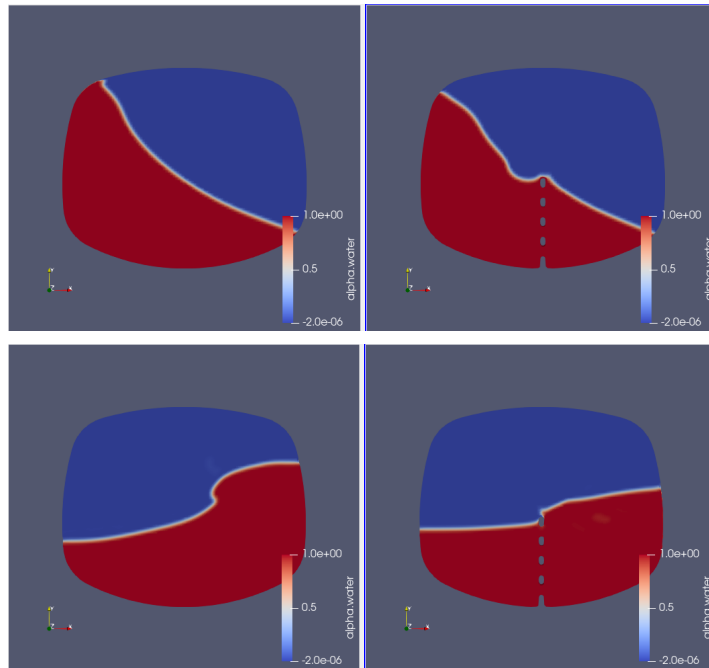


Figura 16a: Comparación de las oscilaciones entre Caso Base y MA con cisterna al 50%.

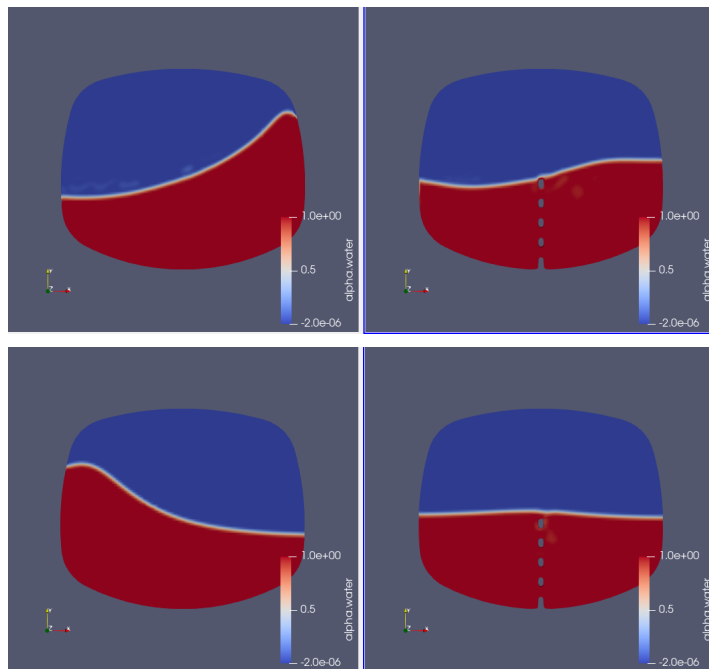


Figura 16b: Comparación de las oscilaciones entre Caso Base y MA con cisterna al 50%.

Como se puede observar en las imágenes de la Figura 16 y analizando las curvas del Gráfico 6 con la cisterna al 50%, el uso de la mampara tiene un fuerte impacto en la disminución de las

oscilaciones una vez que se dejó de aplicar la aceleración. Sin embargo, se observa un efecto negativo durante el tiempo que el camión está tomando la curva, ya que se observan picos de fuerza por encima del caso Base. En el caso donde llenamos la cisterna a un 85%, el impacto de la mampara en el movimiento del líquido no es significativo, y nuevamente se observa un pico de fuerza mayor al caso Base al momento de aplicarse la aceleración para esta geometría de cisterna. Al igual que en el caso anterior, los valores de fuerzas en la cisterna al 50% son mayores que los de la cisterna al 85% para todos los casos.

### Cisterna Ovalada

Analizando el caso de la cisterna ovalada, este tiene un comportamiento similar al de la cisterna cilíndrica, donde si bien en el momento de la aceleración no hay mucha diferencia en la magnitud de la fuerza horizontal a la que es sometida la cisterna, las mamparas reducen significativamente el pico de la fuerza y amortiguan significativamente la oscilación una vez que se deja de aplicar la aceleración.

Nuevamente se observa que la mampara MB tiene un mejor desempeño en la reducción de la frecuencia de oscilación respecto de MA, pero los picos máximos de fuerza son similares.

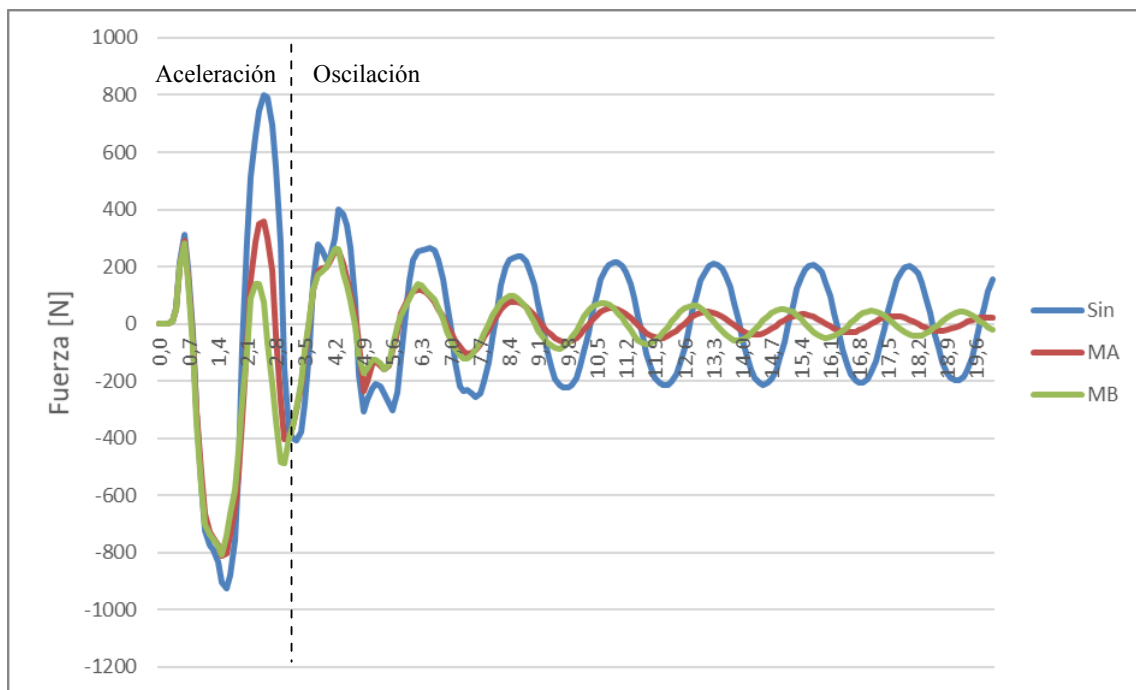


Gráfico 8: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 50%.

Por otro lado, con la cisterna llena al 85%, el uso de una mampara interna es despreciable en la amortiguación de la oscilación del fluido dentro del tanque y la magnitud de la fuerza no varía mucho respecto de utilizar o no una mampara, tanto en la etapa de aceleración como de oscilación.

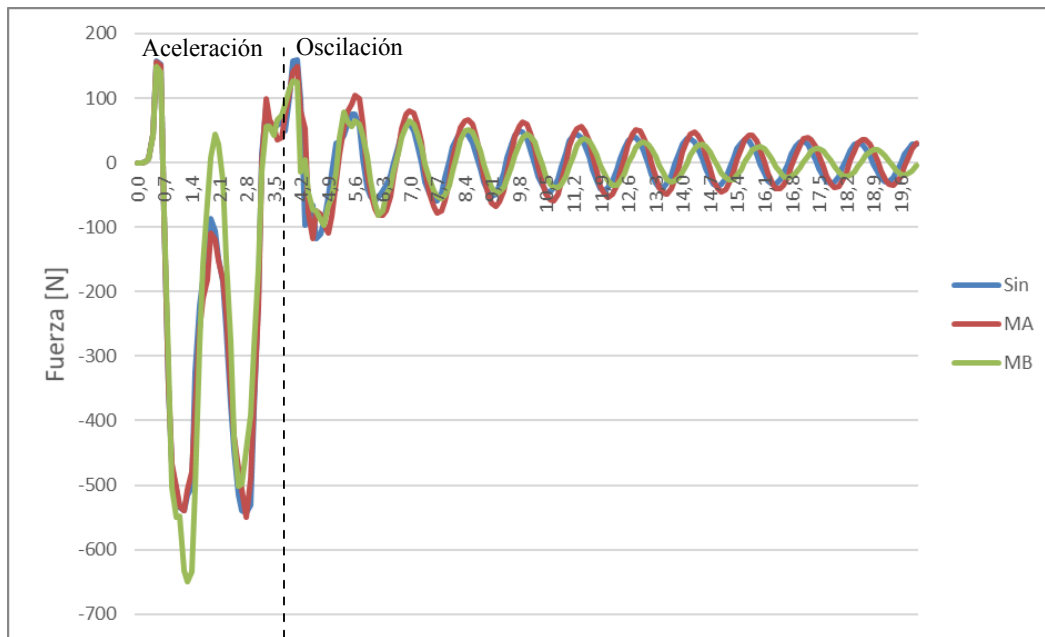


Gráfico 9: Fuerza resultante en el eje x en función del tiempo, cisterna 85%.

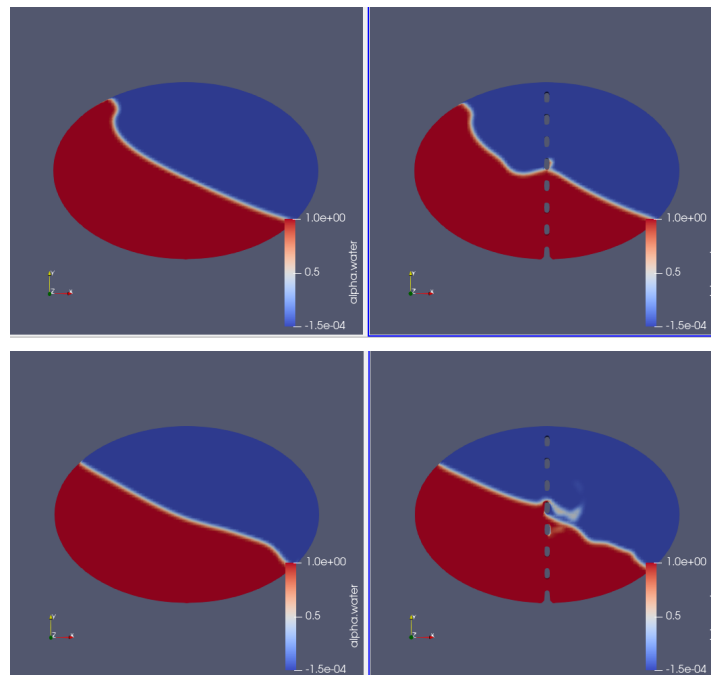


Figura 17.a: Comparación de las oscilaciones entre Caso Base y MB con cisterna al 50%.

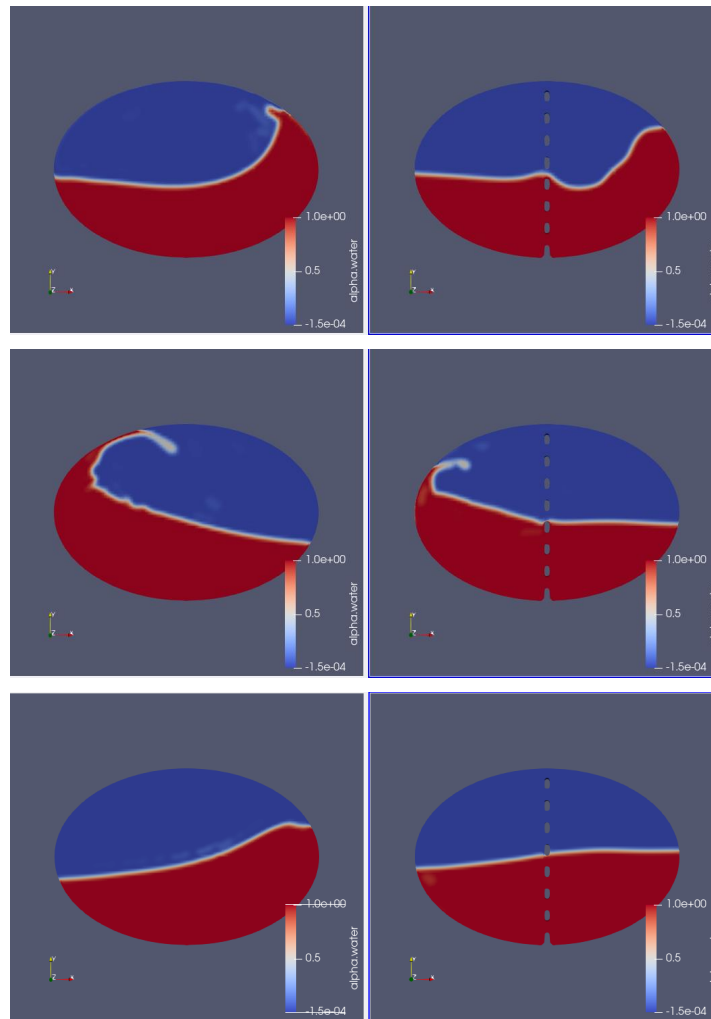


Figura 17b: Comparación de las oscilaciones entre Caso Base y MB con cisterna al 50%.

Como se observa en Figura 17, nuevamente se puede concluir que el uso de una mampara interfiere significativamente en el movimiento de la onda, reduciendo su fuerza y frenando el fluido dentro de la cisterna. A su vez, la altura máxima a la que rompe la ola del fluido al impactar contra las paredes de la cisterna es mayor en el caso Base, y el tiempo de oscilación es menor con el uso de la mampara.

**Pros y Contras: Geometría de la Cisterna**

CISTERNA	PRO	CONTRA
Cilíndrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bueno para transporte de líquidos a alta presión</li> <li>Buena reducción en la fuerza producto de la oscilación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor capacidad de almacenaje</li> <li>Se observa un pico inicial de fuerzas mayor al resto</li> </ul>
Cuadrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor capacidad de almacenaje</li> <li>Menor Frecuencia de oscilación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor reducción en la fuerza producto de la oscilación</li> </ul>
Ovalada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejor reducción en la fuerza producto de la oscilación</li> <li>Muy utilizado en el transporte de Combustibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor altura en el oleaje inicial del líquido</li> </ul>

**Simulación 3D**

Al evaluar el modelo en tres dimensiones, hay que tener en cuenta que adicionalmente a la aceleración lateral que se aplicó en el modelo 2D, en este caso se incluyó una aceleración longitudinal simulando que el camión disminuye la velocidad antes de ingresar a la curva.

Se puede observar que el fluido se comporta de la misma forma que en los casos analizados en dos dimensiones y se ve con más claridad como el uso de la mampara trabaja para interferir en la oscilación del líquido producto de la aceleración.



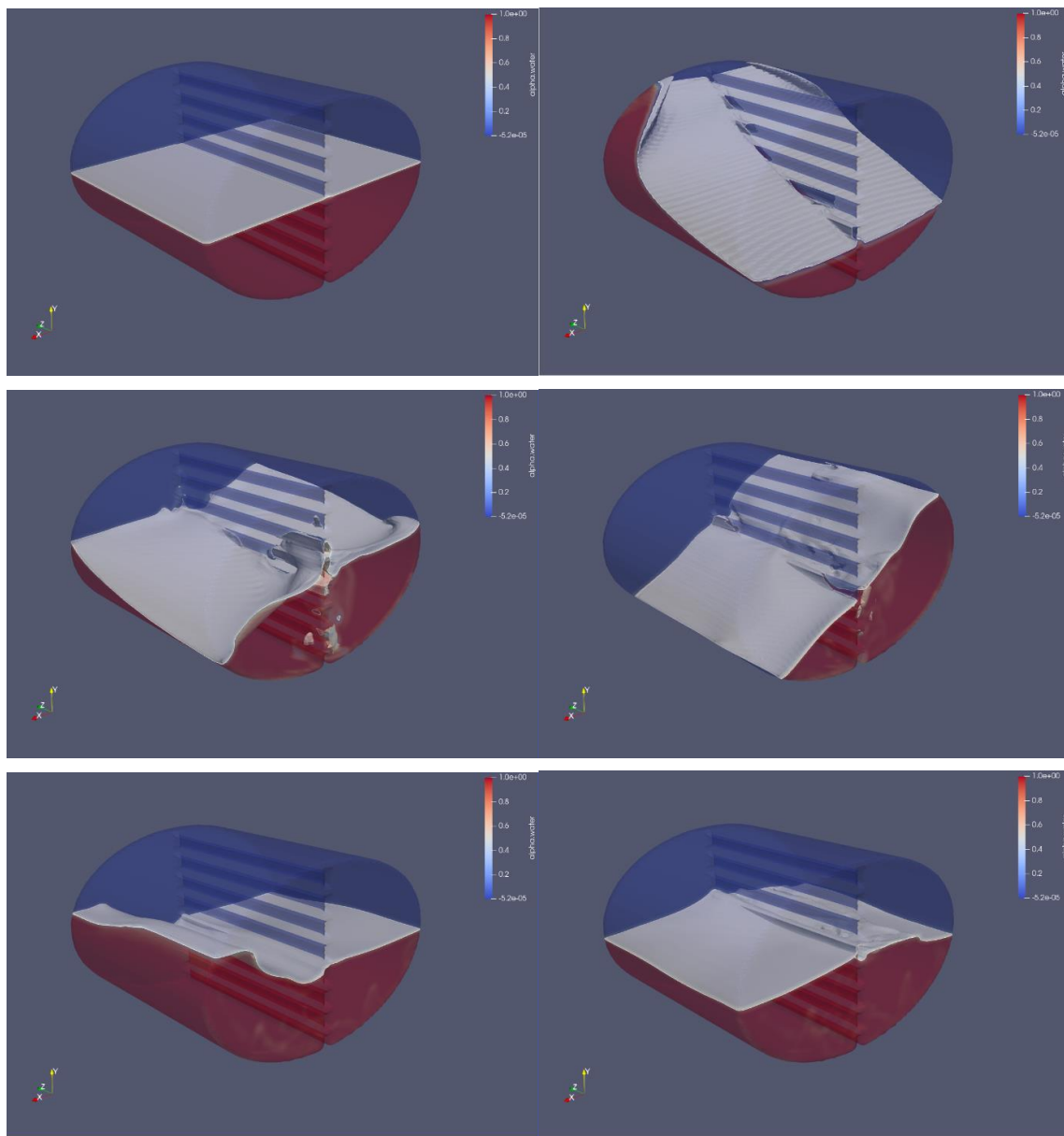


Figura18a: Capturas de imágenes del modelo en 3D.

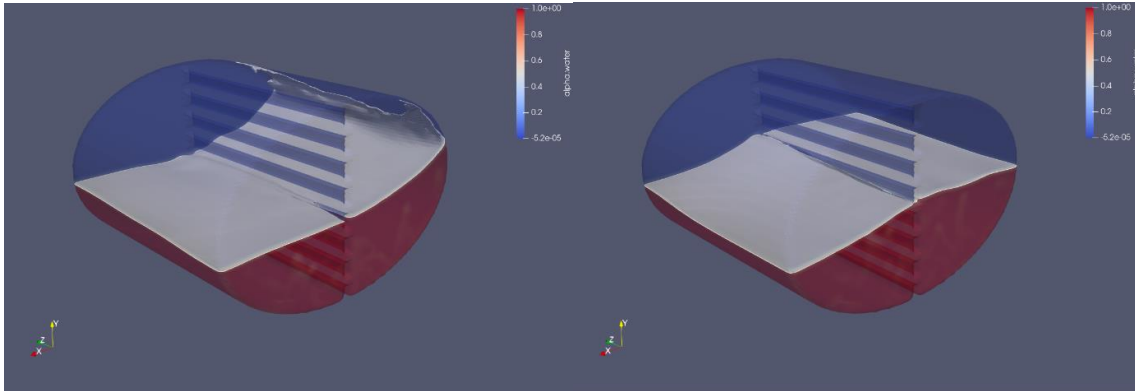


Figura18b: Capturas de imágenes del modelo en 3D.

Como se puede observar en las capturas de la Figura 18, la segunda imagen correspondiente al tiempo  $t=1,1s$  donde se solo se está aplicando la aceleración longitudinal (frenado) y luego en el tiempo  $t=2$  ya se comienza a observar el efecto de la aceleración lateral sobre el líquido. Si bien el movimiento es importante al momento de ser aplicadas las aceleraciones, rápidamente la mampara disminuye el movimiento del oleaje dentro de la cisterna, bajando a una oscilación mucho más controlada y de menor fuerza o impacto.

En la Figura 19 se puede observar que al pasar la ola por la mampara se genera una turbulencia en el líquido que reduce significativamente el movimiento de la oscilación.

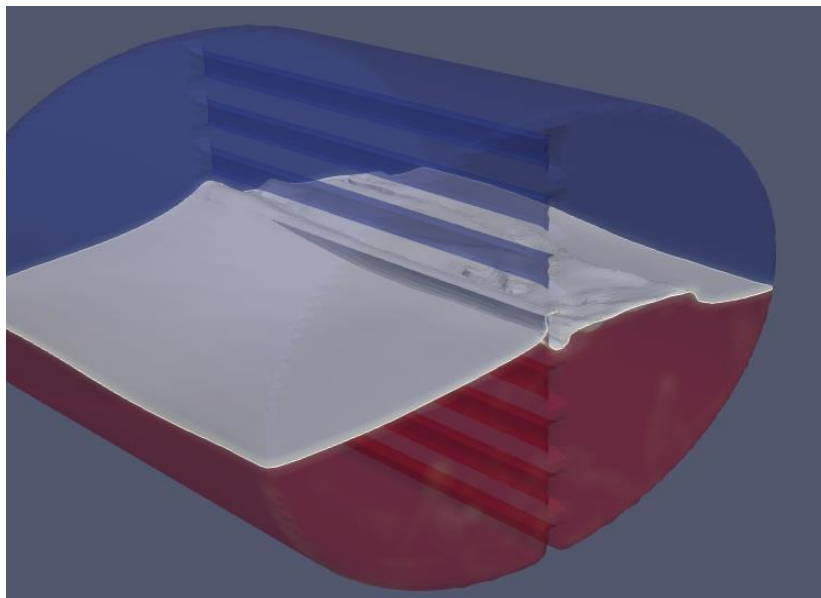


Figura19: Efecto de la mampara en la superficie del líquido.

## CONCLUSIONES

Si bien hay varios factores en juego, se puede concluir que el uso de una mampara podría aportar un factor más de estabilidad al camión, a un costo relativamente bajo y con una pérdida de volumen dentro de la cisterna que es insignificante respecto del volumen total de carga. La única conta que se podría presentar es el incremento en el peso de la cisterna producto del material adicional utilizado en las mamparas, pero dicho análisis esta fuera del alcance de este estudio.

El efecto de la mampara es más notorio cuando el camión viaja con media carga (Cisterna al 50%), situación que puede ocurrir por descargas parciales en los distintos centros de distribución. Al estar la cisterna llena al 85% la mampara interior no tiene un impacto significativo para esa condición, pero como bien se dijo anteriormente, es una barrera más de mitigación del riesgo, mejorando la estabilidad del camión, a un costo relativamente bajo.

El uso de una mampara a media altura (MA) o una completa (MB), no mostraron diferencias significativas en la capacidad de reducir el movimiento del fluido, sin embargo, el uso de la mampara completa MB, tiene un mayor rango de operación a diferentes volúmenes de carga con la que pueda operar la cisterna.

También se demostró la importancia que tiene transportar el camión con la cisterna llena (85%), ya que se reducen significativamente las fuerzas producidas al ser sometidos a una aceleración horizontal.

Finalmente, si bien no era el foco de este estudio, en los resultados se pudo observar cómo la geometría de la cisterna tiene un efecto importante en cómo se comporta el fluido dentro de la cisterna al ser sometido a una aceleración. Las cisternas cilíndricas y ovaladas tendrían un mejor efecto en la reducción de la oscilación respecto de la de cisterna cuadrada, pero sacrificando capacidad de carga a ser transportada, lo que tiene también un impacto en el costo logístico.

## BIBLIOGRAFÍA

[Ref. 1] Anderson, John D. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: The Basics With Applications, McGraw Hill, Inc. 1995

[Ref. 2] OPENFOAM [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://openfoam.org>>

[Ref. 3] CFD DIRECT [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://cfd.direct/openfoam/computational-fluid-dynamics/>>

[Ref. 4] INTERFOAM [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://openfoamwiki.net/index.php/InterFoam>>

[Ref. 5] MINEM: REFINACION Y COMERCIALIZACION DE PETROLO, GAS Y DERIVADOS [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/refinacion-y-comercializacion-de-petroleo-gas-y-derivados-tablas-dinamicas>>

[Ref. 6] Vincenzo D'Alessandro, MODELING OF TANK VEHICLE DYNAMICS BY FLUID SLOSHING COUPLED SIMULATION, PhD. Plitecnico Di Milano, 2011

[Ref. 7] Chandan D. Chaudhari, et al. Assessing sloshing effect of fluid in tanker feometry through deployment of CAE, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, E-ISSN2249–8974

[Ref. 8] G. Kishore, Calculating Sloshing Impact on Tanker Walls for Fluids at Varying Accelerations, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, ISSN (Online): 2319-7064

[Ref. 9] Alexandra Lehnart, Florian Fleißner, Peter Eberhard, Simulating tank vehicles with sloshing liquid load, Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, 2010

[Ref. 10] Sahin and Bayraktar, *International Journal of Engineering Technologies*, Vol.1, No.3, 2015

[Ref. 11] C Zilio et al 2017 J. Phys, CFD analysis of aircraft fuel tanks thermal behaviour, Conf. Ser. 923 012027

[ref. 12] SolidWorks [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://www.solidworks.com>>

[ref. 13] ParaView [en Línea] [Consulta 21 Sep. 2021]  
<<https://www.paraview.org/>>

## ANEXO A

### Ecuaciones InterFoam

#### Ecuaciones de Continuidad:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

#### Ecuaciones de Momento:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{t_{ij}}) + \rho g_i + f_{\sigma i} \quad (3)$$

Donde  $u$  representa la velocidad,  $g_i$  la aceleración de la gravedad,  $p$  la presión,  $f_{\sigma i}$  la tensión superficial y  $\tau_{ij}$  y  $\tau_{t_{ij}}$  la viscosidad y turbulencias.

La densidad  $\rho$  se define como:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

$\alpha$  es igual a 1 dentro del fluido 1 con densidad  $\rho_1$  y 0 en el fluido 2 con densidad  $\rho_2$ . En la interfaz entre ambos fluidos  $\alpha$  varia entre 0 y 1.

La tensión superficial  $f_{\sigma i}$  es modelado como una fuerza de superficie continua y se calcula como:

$$f_{\sigma i} = \sigma k \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (5)$$

$\sigma$  es la tensión superficial constante y  $k$  la curvatura. La curvatura se puede aproximar con la siguiente formula:

$$k = \frac{-\partial n_i}{\partial x_i} = \frac{-\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (6)$$

#### Ecuación en la interfaz:

Para saber dónde se encuentra la interfaz entre los 2 fluidos, se debe resolver una ecuación adicional para  $\alpha$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

Esta ecuación puede verse como la conservación de los componentes de la mezcla a lo largo de la trayectoria de una celda de fluido.

## ANEXO B

### Tabla de Fuerzas (PostProceso)

A continuación, se incluyen las tablas donde podrán encontrar todos los resultados de Fuerza obtenidos en las simulaciones para cada uno de los casos de estudio.

Las tablas están en función del tiempo  $t$  en segundos [s] y los valores de fuerza están expresados en Newton [N]









