

## DISEÑO Y ESTUDIO POR CFD DE ANILLOS “ANTISLOSHING” PARA UN TANQUE DE PROPELENTE.

A.C. Brocchi, A. Scarabino, M. Herrera, F. Bacchi, J.M. Torres Zanardi  
Grupo de Fluidodinámica Computacional GFC -Universidad Nacional de La Plata, Facultad  
de Ingeniería, La Plata, Argentina.  
Autor principal: ana.brocchi@alu.ing.unlp.edu.ar

### RESUMEN

*El fenómeno de “sloshing” u “oleaje” consiste en la oscilación de un líquido confinado, que implica la deformación de su superficie libre y el desplazamiento de su centro de masa, lo que produce fuerzas laterales sobre el tanque contenedor, que pueden desestabilizar el vehículo que lo transporta. Esto es particularmente crítico en vehículos espaciales. Para mitigar este efecto, existen diversas soluciones, una de las cuales es disponer de anillos amortiguadores en la pared del tanque. En este trabajo se diseña un conjunto de anillos antisloshing para un tanque cilíndrico de propelente de uso aeroespacial, a partir del cálculo analítico de frecuencia naturales de oscilación del líquido y en base a factores de amortiguamiento reportados en la bibliografía. Se realizó una simulación numérica del movimiento del combustible presurizado dentro del tanque, con una perturbación definida arbitrariamente. Se analizó la deformación de la superficie libre y las fuerzas laterales que el propelente produce sobre la pared del tanque a lo largo del tiempo, producto de su oscilación.*

**Palabras clave:** sloshing, oleaje, amortiguamiento, CFD.

### INTRODUCCIÓN

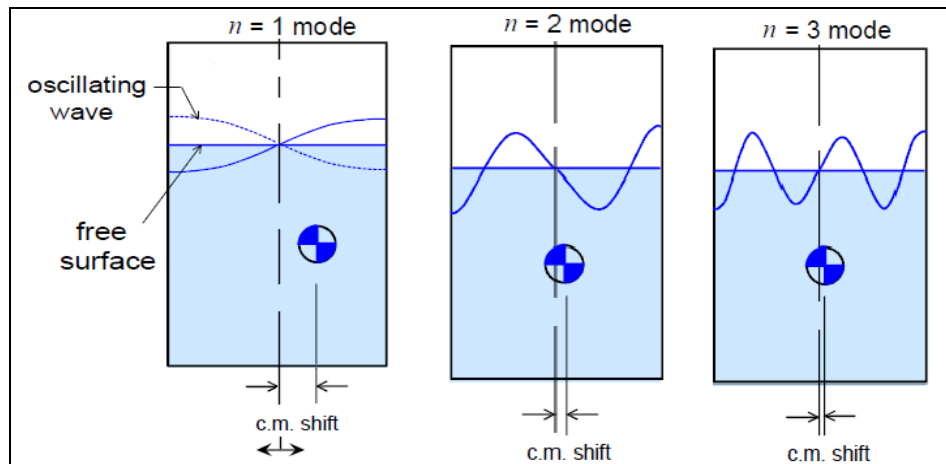
Los vehículos espaciales de combustible líquido logran el empuje necesario a través de la combustión en sus motores cohete. En un vehículo con combustible líquido, las bombas impulsan a los propelentes a través de líneas de alimentación desde sus tanques de almacenamiento hasta la cámara de combustión del motor. Los parámetros termodinámicos (presiones, temperaturas, etc.) presentes y las condiciones de contorno que se dan a lo largo de todo el recorrido que efectúa el líquido hasta ser quemado en la cámara de combustión, dan lugar a distintos fenómenos fluidodinámicos que deben ser estudiados para lograr un óptimo funcionamiento del conjunto.

El fenómeno que se abordará en este trabajo se conoce como "sloshing", y se manifiesta en los tanques de propelente. El fenómeno de “sloshing” es definido como un movimiento ondulatorio de la superficie libre de un líquido dentro de un recipiente parcialmente lleno. Este movimiento relativo del fluido trae asociadas inestabilidades dinámicas que pueden perjudicar el correcto desempeño e incluso llevar a la falla a sistemas en donde la interacción entre el fluido y la estructura se hace muy importante, como en este caso, sistemas de almacenamiento de propelentes líquidos en vehículos espaciales. El líquido en movimiento dentro de los contenedores produce aceleraciones adicionales y corrimientos del centro de masa, afectando la estabilidad del vehículo y principalmente el control durante las distintas etapas de vuelo [1]. Este fenómeno viene siendo estudiado desde el inicio de las misiones de exploración espacial [2,3] y diversas estrategias de solución han sido propuestas. En este trabajo utilizaremos la metodología ya realizada en [4] para diseñar un conjunto de anillos antisloshing a partir del cálculo analítico de frecuencia naturales de oscilación del líquido y en base a factores de amortiguamiento reportados en la bibliografía. Se realizó una simulación numérica del movimiento del combustible presurizado dentro del tanque, con una perturbación definida arbitrariamente con el solo propósito de evaluar la eficiencia del sistema. Se analizaron la deformación de la superficie libre y las fuerzas laterales que el propelente produce sobre la pared del tanque a lo largo del tiempo, producto de su oscilación.

## METODOLOGÍA

### CÁLCULO DE LAS FRECUENCIAS NATURALES

Para el cálculo de frecuencias naturales de sloshing en el tanque se seguirá la metodología desarrollada en el libro de Ibrahim [1]. Se calculan las frecuencias de los primeros modos simétricos y antisimétricos, considerando que el primer modo antisimétrico es el más perjudicial, por las cargas laterales que genera, debido al mayor desplazamiento del centro de masa del fluido, como se ve en la Figura 1 (de [1]).



**Figura 1.** Primeros modos antisimétricos de sloshing ([1]).

Las frecuencias naturales están dadas por la expresión:

$$\omega_{mn}^2 = \left[ \frac{g\xi_{mn}}{R} + \frac{\sigma\xi_{mn}^3}{\rho R^3} J_{mn} \right] \tanh\left(\frac{\xi_{mn}h}{R}\right) \quad [1]$$

Si se desprecia la tensión superficial y se suponen oscilaciones lineales, las frecuencias de los modos se pueden aproximar con la expresión:

$$\omega_{mn}^2 = \left[ \frac{g\xi_{mn}}{R} \right] \tanh\left(\frac{\xi_{mn}h}{R}\right) \quad [2]$$

$g$ : aceleración de la gravedad

$R$ : radio del recipiente

$h$ : altura del fluido

$\xi_{mn}$ : raíces de la función de Bessel del primer tipo

$\rho$ : densidad

$J_{mn}$ : función de Bessel del primer tipo de orden  $m$

Se consideran los primeros modos asimétricos (oscilaciones laterales) para un tanque cilíndrico vertical de altura  $h_{total}$  y diámetro  $D$ . Los cálculos analíticos se realizan con modelo de oscilaciones lineales y fluido no viscoso. Bajo estas hipótesis, la frecuencia de oscilación es independiente de la densidad del fluido y solamente depende de las dimensiones del tanque y de la aceleración axial a la que el fluido es sometido.

De acuerdo con las aceleraciones dentro de la etapa de empuje, se considerarán cuatro instantes de tiempo para el cálculo de las frecuencias naturales de los primeros 5 modos antisimétricos de "sloshing", con distintas alturas de propelente en el tanque. La Tabla 1 muestra las frecuencias calculadas para cada instante de tiempo, en función de la altura de líquido en el tanque,  $h$ , y la aceleración axial experimentada,  $g$ .

**Tabla 1.** Frecuencias naturales calculadas para los primeros modos antisimétricos de sloshing.

Modos antisimétricos					
$t_1$		$h (m) = 90\% h_{total}$		$g (m/s^2) = 13$	
Modos	1	2	3	4	5
f(Hz)	<b>1.3221</b>	2.2507	2.8468	3.2618	3.755
$t_2$		$h (m) = 67.5\% h_{total}$		$g (m/s^2) = 15.35$	
Modos	1	2	3	4	5
f(Hz)	<b>1.4367</b>	2.4457	3.0934	3.5444	4.0804
$t_3$		$h (m) = 45\% h_{total}$		$g (m/s^2) = 17.6$	
Modos	1	2	3	4	5
f(Hz)	<b>1.5384</b>	2.6188	3.3124	3.7953	4.3692
$t_4$		$h (m) = 22.5\% h_{total}$		$g (m/s^2) = 26.1$	
Modos	1	2	3	4	5
f(Hz)	<b>1.864</b>	3.1891	4.0337	4.6218	5.3206

Se observa que las frecuencias del primer modo de oscilación lateral varían según la aceleración y el nivel del tanque, entre 1.3221 Hz, para el tanque lleno al 90% de la altura total; hasta 1.664 Hz con una altura de líquido del 22.5%. Se desprende de este análisis que las frecuencias de “sloshing” con mayor probabilidad de afectar la estabilidad del sistema están entre 1 y 2 Hz.

#### DIMENSIONADO DEL SISTEMA ANTISLOSHING

En primer lugar, definimos formalmente el amortiguamiento, que para un sistema lineal puede interpretarse como la fracción de energía mecánica disipada en un ciclo de oscilación:

$$\zeta = \frac{|dE / dt|}{2\omega E} \quad [3]$$

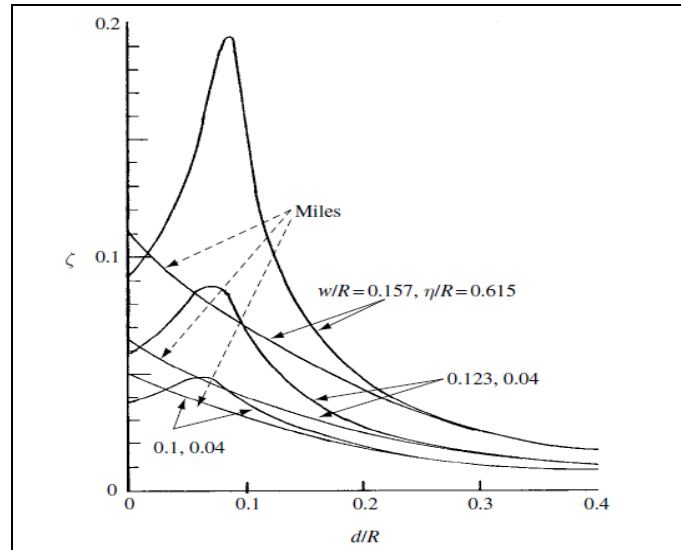
donde  $\omega$  es la frecuencia de oscilación y  $dE/dt$  es la tasa media de disipación de energía.

Para el cálculo analítico del factor de amortiguación que imparte un anillo inmerso en el fluido, se utiliza la formulación analítica de Miles [5], que relaciona distintos parámetros, considerando que se ubica un anillo en el tanque y este disipa la energía cinética del movimiento del fluido ciclo a ciclo.

El factor de amortiguamiento correspondiente a cada escala de tiempo se obtiene de la ecuación [4], donde  $w$  es el ancho del anillo amortiguador,  $R$  es el radio del tanque,  $d$ , la altura del líquido sobre el anillo, y  $\eta_l$ , la máxima amplitud de una ola del líquido:

$$\zeta = 2.83e^{-4.5d/R} \left(2 - \frac{w}{R}\right)^{3/2} \left(\frac{w}{R}\right)^{3/2} \left(\frac{\eta_l}{R}\right)^{1/2} \quad [4]$$

Como podemos observar, el factor de amortiguamiento depende principalmente de la fracción del radio ocupada por el anillo. Por lo tanto, es necesario para llevar a cabo el diseño de los dispositivos y obtener su amortiguamiento, determinar la anchura, la separación y la profundidad a la cual se colocarán los anillos. En la Figura 2 (de [1]), se muestra el factor de amortiguación y su dependencia con el ancho del anillo para distintos casos.



**Figura 2.** Factor de amortiguamiento para distintas relaciones  $w/R$ .

El amortiguamiento proporcionado por un anillo deflector rígido se analiza por analogía al arrastre que se genera en una placa plana inmersa en un flujo oscilatorio. Para ello se consideran las siguientes hipótesis:

- El líquido oscila en los modos fundamentales de sloshing
- La dirección del flujo se supone normal al anillo
- El flujo en las proximidades del anillo no se ve afectado por la superficie libre ni por el fondo del tanque. Esto requiere suponer que el anillo ocupa un pequeño porcentaje de la superficie transversal del tanque y que no se encuentra cercano al fondo.

Si la altura de líquido es mayor que el radio del tanque y se considera un desnivel máximo de líquido sobre la superficie media igual a  $0.2h$ , la expresión para el factor de amortiguamiento queda:

$$\zeta = 1.266 e^{-4.5d/R} \left(2 - \frac{w}{R}\right)^{3/2} \left(\frac{w}{R}\right)^{3/2} \quad [5]$$

En función de estos parámetros se elige una relación  $w/R = 0.1428$ , lo que da un factor de amortiguamiento máximo del 0.15 cuando la profundidad del anillo es de  $0.014 D$ , que baja hasta 0.0465 cuando este se encuentra  $0.14 D$  por debajo de la superficie del líquido.

Por lo tanto, se proponen anillos de  $0.07 D$  de ancho, con un espaciado de  $0.14 D$  para mantener un amortiguamiento razonable. El espesor de los anillos debe ser determinado a partir del cálculo estructural.

Una vez dimensionado el sistema antisloshing, realizamos una simulación numérica con una condición de aceleración definida arbitrariamente, para comparar las respuestas dinámicas del líquido en el tanque sin anillos y con el sistema antisloshing propuesto.

## MODELO PARA SIMULACIÓN

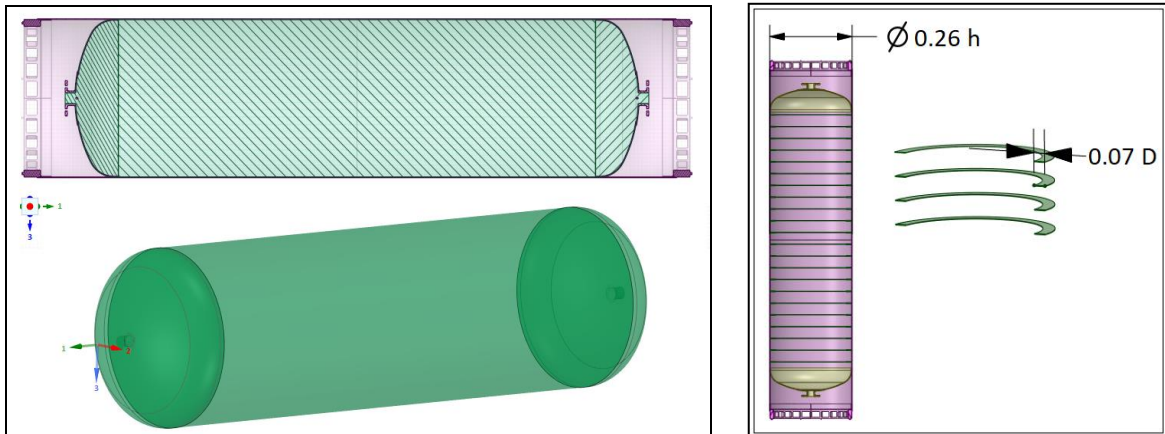
Se utilizó el programa Ansys Fluent 2022 R2, con un solver basado en presiones (modelo "SIMPLE"). Las fuerzas en juego en el fenómeno de sloshing son principalmente la gravedad y los efectos inerciales, teniendo muy poca influencia los efectos viscosos [1]. El número de Reynolds del flujo basado en la velocidad vertical del oleaje y el ancho de los anillos es alrededor de 20000, por lo cual las capas límite involucradas serán laminares. Por estas consideraciones se optó por un solver laminar. Se utilizó para el flujo multifásico el modelo "Volume of Fluid" (VOF) y se realizó un análisis no estacionario, considerando al flujo isotérmico e incompresible.

Las propiedades del líquido en la simulación son las definidas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades del fluido

Propiedades del fluido	
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	800
Viscosidad dinámica [Pa.s]	0.00173

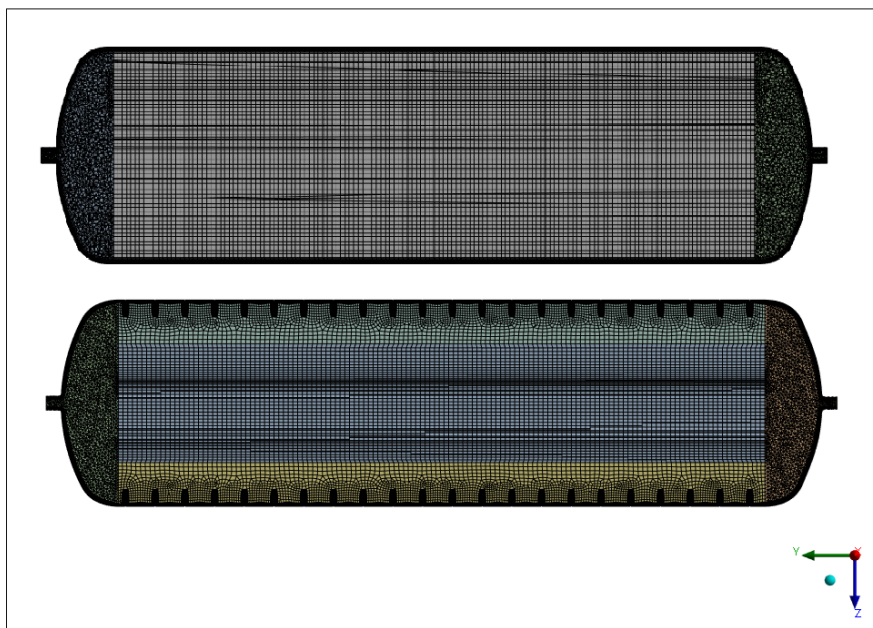
Figura 3 se muestra el dominio de cómputo del tanque sin los anillos y la configuración con los anillos antisloshing del sistema diseñado.



**Figura 3.** Dominio fluido del tanque sin anillos antisloshing izquierda) y tanque con anillos antisloshing (derecha)

## DISCRETIZACIÓN

Para el mallado del dominio se empleó un esquema multibloques a los efectos de optimizar la cantidad y calidad de los elementos. Todas las mallas son del tipo híbridas.



**Figura 4.** Arriba, detalle del mallado del dominio del tanque sin anillos. Abajo, detalle del mallado del dominio del tanque con anillos.

La cantidad de elementos para la versión del tanque correspondiente a la Figura 4 sin anillos es de 1093692, mientras que la cantidad de elementos con anillos es de 1418766, ambos casos con parámetros de calidad de malla (*skewness* y *orthogonal quality*) acorde a los límites recomendados. En la Figura 4 se muestra una vista con un corte longitudinal del tanque en el que se aprecia el tipo y la distribución de elementos para cada caso.

### PERTURBACIÓN IMPUESTA

Se definió una perturbación arbitraria con el fin de analizar la respuesta de los anillos antisloshing, graficada en la Figura 5:

- 1) Inicialmente el líquido se encuentra en reposo, con una aceleración gravitatoria de  $-9.80 \text{ m/s}^2$  ( $-1 \text{ g}$ ) en la dirección axial del tanque.
- 2) En  $t = 0$  se aplica, además, una aceleración lateral de magnitud  $9.80 \text{ m/s}^2$  ( $1 \text{ g}$ ), con una duración de  $0.4 \text{ s}$ , manteniendo la aceleración axial de  $-1 \text{ g}$ .
- 3) En  $t = 0.4 \text{ s}$  desaparece la aceleración lateral y se analiza la evolución de las oscilaciones del líquido en el tanque. Para cuantificar su efecto, se calcula la fuerza resultante lateral sobre la pared cilíndrica.

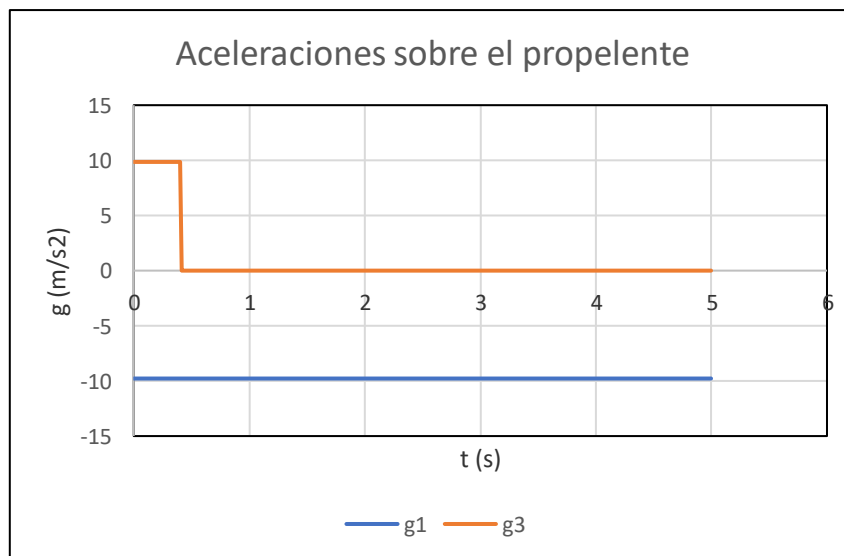


Figura 5. Aceleraciones, longitudinal ( $g_1$ ) y lateral ( $g_3$ ) aplicadas para la simulación en CFD

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figura 6 y Figura 7 muestran imágenes en el plano de las aceleraciones, de las concentraciones de líquido (rojo) y gas (azul) en instantes de tiempo sucesivos, a partir del momento en que deja de aplicarse la aceleración lateral ( $t = 0.4 \text{ s}$ ). Las imágenes muestran el rápido amortiguamiento de la oscilación que producen los anillos una vez que desaparece dicha aceleración lateral.

Para poder cuantificar de forma más precisa el efecto de los anillos, se calculó la evolución en el tiempo de la fuerza neta lateral sobre la pared del tanque, comparando los valores obtenidos sin y con anillos. La Figura 8 muestra la evolución de dichas fuerzas.

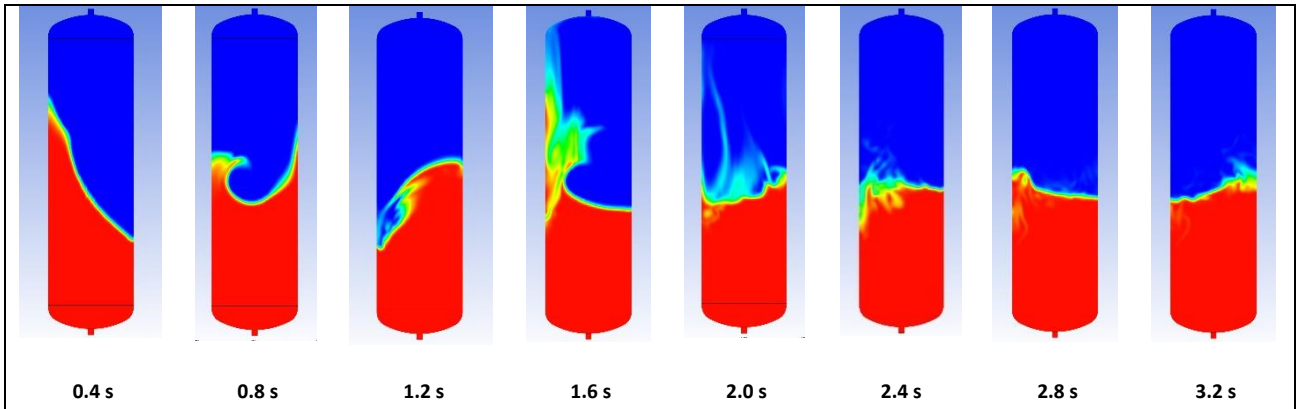


Figura 6. Oscilación lateral del combustible en tanque sin anillos ante las aceleraciones impuestas.

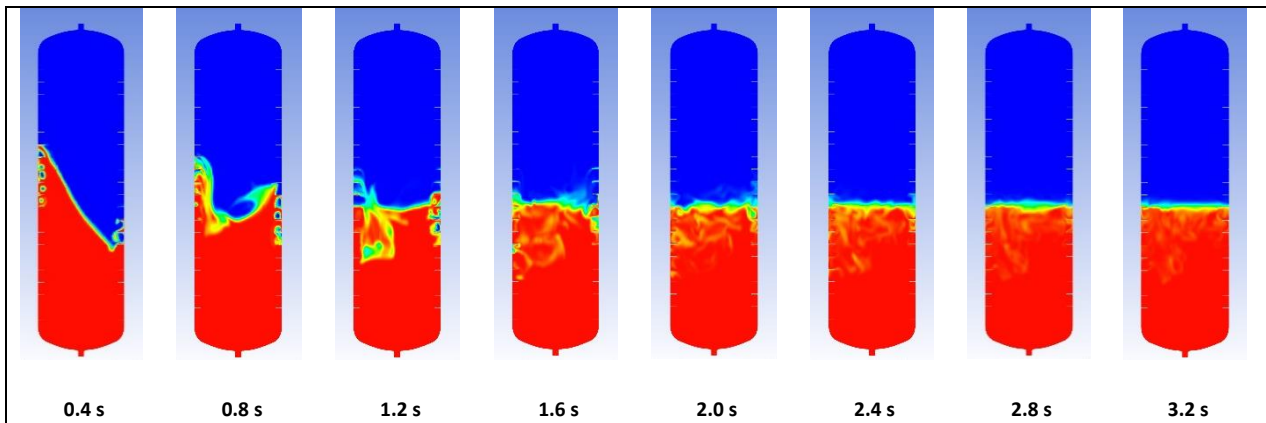


Figura 7. Oscilación lateral del combustible en tanque con anillos antisloshing ante las aceleraciones impuestas.

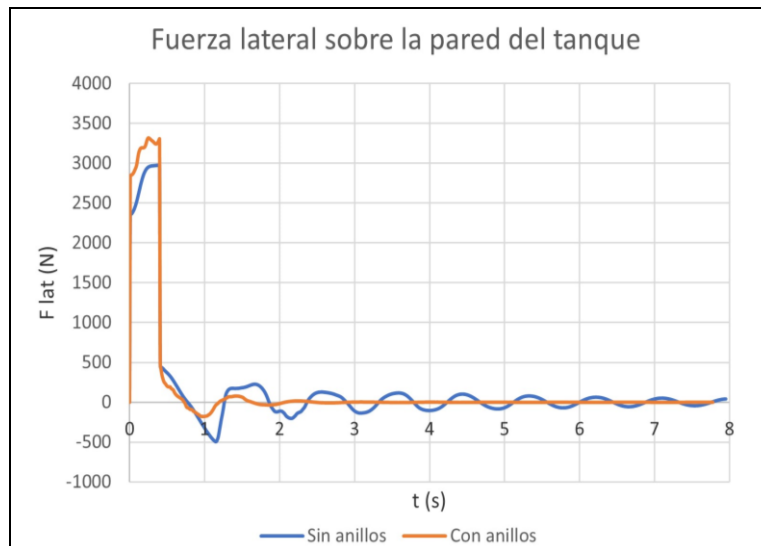


Figura 8. Fuerza lateral sobre la pared del tanque ante las aceleraciones impuestas.

Se observa en la Figura 8 que, para esta perturbación en particular, si bien la máxima fuerza lateral inicial es un 10% mayor con los anillos antisloshing, estos valores caen rápidamente. La Tabla 3 muestra los picos de fuerza para cada semiperiodo de oscilación, así como el decremento logarítmico de las fuerzas y el coeficiente de amortiguamiento en cada ciclo (de dos semiperiodos). En el segundo semiperiodo (desplazamiento del fluido en dirección opuesta a la inicial), los anillos reducen la fuerza lateral al 35.6% en comparación con el caso sin anillos, y a partir del tercer ciclo, los anillos llevan las fuerzas laterales debidas al desplazamiento del fluido a un valor menor al 5% de las cargas en el tanque sin anillos. Por otra parte, el factor de amortiguamiento logrado con los anillos se estabiliza

alrededor de 0.11 en los ciclos segundo y tercero, coincidiendo con el valor de diseño, y decayendo para las oscilaciones ya amortiguadas a partir del cuarto ciclo en las que la fuerza lateral es de apenas 3 N. Por el contrario, el coeficiente de amortiguamiento sin los anillos es menor a 0.04 a partir del segundo ciclo, y en el cuarto, la fuerza lateral supera los 100 N.

**Tabla 3.** Fuerzas máximas laterales sin y con anillos y su cociente

Semiperiodo	Sin anillos			Con anillos			Cociente F max.
	F max (N)	Decr. log.	Coef. amort.	F max (N)	Decr. log.	Coef. amort.	
1	2980.74			3305.636			1.109
2	-497.395			-178.588			0.359
3	225.527	1.121	0.176	78.751	1.623	0.250	0.349
4	-202.497	0.390	0.062	-34.114	0.719	0.114	0.168
5	127.419	0.248	0.039	17.078	0.664	0.105	0.134
6	-137.232	0.169	0.027	-7.055	0.684	0.108	0.051
7	115.822	0.041	0.007	3.146	0.735	0.116	0.027
8	-104.907	0.117	0.019	-2.890	0.388	0.062	0.028
9	101.574	0.057	0.009	2.100	0.176	0.028	0.021
10	-85.046	0.091	0.015	-1.286	0.352	0.056	0.015

## CONCLUSIONES

Para un tanque estructural de uso aeroespacial se calcularon las frecuencias naturales de sloshing y se diseñó un sistema de anillos antisloshing, basados en las frecuencias y modos naturales de oscilación del propelente según los datos de la geometría del tanque, propiedades del fluido y cuatro condiciones de nivel de líquido y aceleraciones de la trayectoria. El sistema se diseñó para lograr factores de amortiguamiento entre 0.15 y 0.045, dependiendo de la profundidad bajo la superficie libre a la que se encuentra el primer anillo.

Para evaluar la eficiencia del sistema, se optó por imponer arbitrariamente una condición de aceleración lateral variable en el tiempo que produjera oscilaciones notables en el líquido. Para esta condición se observó una muy buena respuesta del sistema antisloshing, que redujo las cargas laterales sobre el tanque al 35.9% en el segundo semiperiodo del primer ciclo de oscilación, y a menos del 5.1 % a partir del tercer ciclo, en comparación con las cargas producidas por las oscilaciones del líquido en el tanque sin anillos. Los resultados numéricos permitieron evaluar y cuantificar las fuerzas laterales causadas por sloshing y su reducción con el sistema de anillos. También confirmaron que el coeficiente de amortiguamiento se encuentra en el rango de diseño.

## REFERENCIAS

1. Ibrahim, R, Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications. Cambridge University Press. (2005).
2. Abramson H.N., The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers- With Applications to Space Vehicle Technology, NASA SP 106 (1966).
3. Stephens D. G., Leonard H.W., Perry T.W., Investigation of the damping of liquids in right circular tanks including the effects of a time-variant liquid depth, NASA TN D-1367 (1962).
4. Bruno, L. Scarabino, A., Bacchi, F. "Diseño de dispositivos anti-sloshing para un vehiculo espacial de combustible líquido". Anales AFA, Edición Especial Física de Fluidos, Vol. 23, No. 3. Pág. 47-52. (2013).
5. Miles J. W., Ring damping of free surface oscillations in a circular tank, J. Appl Mech. 25(2), 274-276. (1958).