



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FLUIDO-ESTRUCTURAL  
EN CONDICIONES DINÁMICAS DE UN TANQUERO CON  
CAPACIDAD DE 10000 GAL, PARA EL TRANSPORTE DE  
COMBUSTIBLE, UTILIZANDO EL MÉTODO COMPUTACIONAL  
TRANSITORIO”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTOR:**

**JONATHAN GIOVANNY HERNÁNDEZ BRAVO**

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FLUIDO-ESTRUCTURAL  
EN CONDICIONES DINÁMICAS DE UN TANQUERO CON  
CAPACIDAD DE 10000 GAL, PARA EL TRANSPORTE DE  
COMBUSTIBLE, UTILIZANDO EL MÉTODO COMPUTACIONAL  
TRANSITORIO”**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo:** Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTOR:** JONATHAN GIOVANNY HERNÁNDEZ BRAVO

**DIRECTOR:** Ing. EDWIN RODOLFO POZO SAFLA

Riobamba – Ecuador

2021

**©2021, Jonathan Giovanni Hernández Bravo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, JONATHAN GIOVANNY HERNÁNDEZ BRAVO, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de diciembre de 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jonathan', enclosed within a large, stylized blue oval scribble.

**Jonathan Giovanni Hernández Bravo**

**230027432-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación: Tipo Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FLUIDO-ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DINÁMICAS DE UN TANQUERO CON CAPACIDAD DE 10000 GAL, PARA EL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE, UTILIZANDO EL MÉTODO COMPUTACIONAL TRANSITORIO**, realizado por el señor: **JONATHAN GIOVANNY HERNÁNDEZ BRAVO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-12-20
Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	_____	2021-12-20
Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba <b>MIEMBRO DE TRIBUNAL</b>	_____	2021-12-20

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación lo dedico directamente a mi madre que me apoyó incondicionalmente en todo el proceso de mi formación profesional, a ella quien me inculcó valores para guiarme por el buen camino. A mis hermanas que me ayudaron a entender que tenía que darles un ejemplo de hermano mayor y no decaer ante nada.

Jonathan

## **AGRADECIMIENTO**

Primero y siempre agradezco a Dios por permitirme alcanzar un peldaño más en mi vida profesional, eternamente agradezco a mi madre por confiar en mí y apoyarme en todo, a mis hermanas que fueron motivación de superación y buen ejemplo, a mis familiares por alentarme a seguir superando cada paso que doy , a mi mujer que me hizo entender que nada es imposible en esta vida, a mi amigo que en paz descansa que me dijo estudia para que seas alguien en la vida, a mis buenos amigos que me cobijaron con buenos consejos de superación.

Agradezco a la carrera de Ingeniería Automotriz de la gloriosa ESPOCH con sus docentes y profesionales que me brindo una oportunidad de superación profesional.

Jonathan

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

## CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Justificación.....	4
1.3. Objetivo.....	5
1.3.1. <i>Objetivo general</i> .....	5
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.4. Hipótesis.....	5
1.5. Estudio del sector hidrocarburífero.....	6
1.5.1. <i>Antecedentes Históricos de la explotación de hidrocarburos en el Ecuador</i> .....	6
1.5.2. <i>La industria y comercio hidrocarburífero en el Ecuador</i> .....	7
1.5.3. <i>Producción Nacional de Petróleo</i> .....	8
1.5.4. <i>Producción Nacional de derivados del Petróleo</i> .....	8
1.5.4.1. <i>Combustibles líquidos derivados del petróleo en Ecuador</i> .....	8
1.5.5. <i>Almacenamiento de derivados de petróleo</i> .....	10
1.5.6. <i>Demanda interna de combustibles</i> .....	10
1.5.7. <i>Transporte de combustibles</i> .....	11
1.5.8. <i>Estudio de semirremolques y remolques cisterna según la Dirección Nacional de Hidrocarburos</i> .....	12
1.5.9. <i>Definición de cisternas móviles para el transporte de combustibles</i> .....	12
1.5.9.1. <i>Definición de tanque cisterna de combustible</i> .....	12
1.5.9.2. <i>Definición de remolque cisterna</i> .....	13
1.5.9.3. <i>Definición de semirremolque cisterna</i> .....	13
1.5.10. <i>Clasificación de semirremolques cisterna</i> .....	14



1.5.10.1. <i>Semirremolque de un eje</i> .....	15
1.5.10.2. <i>Semirremolque de dos ejes</i> .....	15
1.5.10.3. <i>Semirremolque de tres ejes</i> .....	15
1.5.11. <i>Vehículos para el transporte de combustibles</i> .....	16
1.5.12. <i>Estudio de líquido en movimiento</i> .....	17
1.5.13. <i>Efecto que produce el líquido al ser transportado en camiones cisterna</i> .....	17
1.5.13.1. <i>Fuerzas generadas por el movimiento del líquido</i> .....	17
1.5.13.2. <i>Efecto sloushing u oleaje</i> .....	18
1.5.13.3. <i>Efecto del nivel de llenado</i> .....	19
1.5.13.4. <i>Formas de amortiguar el efecto del oleaje</i> .....	20
1.5.14. <i>Principios de Algoritmo Lagrangiano</i> .....	21
1.5.15. <i>Principios de Algoritmo Euleriano</i> .....	21
1.5.16. <i>Metodo ALE (Arbitrary Lagragian Eulerian)</i> .....	22

## CAPÍTULO II

2. <b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	24
2.1. <b>Condiciones de ensayo</b> .....	25
2.1.1. <i>Cálculo de aceleración de frenado</i> .....	25
1.1.2. <i>Cálculo de aceleración de giro</i> .....	26
2.2. <b>Procedimiento de ensayo</b> .....	27
2.2.1. <i>Preparación de modelos</i> .....	27
2.2.2. <i>Condiciones de simulación</i> .....	29
2.2.2.1. <i>Malla de elementos finitos</i> .....	29
2.2.2.2. <i>Condiciones de simulación ALE</i> .....	30
2.2.2.3. <i>Materiales</i> .....	31
2.2.2.4. <i>Ecuaciones de estado</i> .....	32
2.2.2.5. <i>Control de energía</i> .....	32
2.2.2.6. <i>Cargas y aceleraciones en la simulación</i> .....	32
2.2.2.7. <i>Control</i> .....	34
2.2.3. <i>Solución</i> .....	34

## CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.1.</b>	<b><i>Presión bajo aceleración de frenado.....</i></b>	<b>35</b>
<b>3.1.1.1.</b>	<i>Modelo A (Redondo Hueco) .....</i>	<i>35</i>
<b>3.1.1.2.</b>	<i>Modelo B(Triangular) .....</i>	<i>36</i>
<b>3.1.1.3.</b>	<i>Modelo C (Divisiones Separadas).....</i>	<i>36</i>
<b>3.1.1.4.</b>	<i>Modelo D (Sin divisiones) .....</i>	<i>37</i>
<b>3.1.2.</b>	<b><i>Presión bajo aceleración de giro.....</i></b>	<b>38</b>
<b>3.1.2.1.</b>	<i>Modelo A (Redondo Hueco) .....</i>	<i>38</i>
<b>3.1.2.2.</b>	<i>Modelo B (Triangular) .....</i>	<i>38</i>
<b>3.1.2.3.</b>	<i>Modelo C (Divisiones Separadas).....</i>	<i>39</i>
<b>3.1.2.4.</b>	<i>Modelo D (Sin Divisiones).....</i>	<i>40</i>
<b>3.1.3.</b>	<b><i>Velocidad bajo aceleración de frenado .....</i></b>	<b>40</b>
<b>3.1.3.1.</b>	<i>Modelo A (Redondo Hueco) .....</i>	<i>40</i>
<b>3.1.3.2.</b>	<i>Modelo B (Triangular) .....</i>	<i>41</i>
<b>3.1.3.3.</b>	<i>Modelo C (Divisiones Separadas).....</i>	<i>42</i>
<b>3.1.3.4.</b>	<i>Modelo D (Sin Divisiones).....</i>	<i>42</i>
<b>3.1.4.</b>	<b><i>Velocidad bajo aceleración de giro .....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.1.4.1.</b>	<i>Modelo A (Redondo Hueco) .....</i>	<i>43</i>
<b>3.1.4.2.</b>	<i>Modelo B (Triangular) .....</i>	<i>44</i>
<b>3.1.4.3.</b>	<i>Modelo C (Divisiones Separadas).....</i>	<i>45</i>
<b>3.1.4.4.</b>	<i>Modelo D (Sin Divisiones).....</i>	<i>45</i>
<b>3.2.</b>	<b>Discusión de resultados .....</b>	<b>46</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>52</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Producción nacional de petróleo por millones de barriles. ....	8
<b>Tabla 2-1:</b>	Producción nacional de petróleo por miles de barriles. ....	8
<b>Tabla 3-1:</b>	Clasificación de los tipos de combustibles, según CFR.....	9
<b>Tabla 4-1:</b>	Demanda de derivados de petróleos por millones de barriles.....	9
<b>Tabla 5-1:</b>	Consumo interno de derivados de petróleo diarios por barriles.....	11
<b>Tabla 6-1:</b>	Tipo de vehículos para transporte de tanques. ....	16
<b>Tabla 7-1:</b>	Capacidad máxima para el transporte de combustibles en función del tipo de vehículo tractor. ....	17
<b>Tabla 1-2:</b>	Simulaciones Propuestas.....	24
<b>Tabla 2-2:</b>	Dimensiones y características de tanquero de capacidad de 10000 galones.....	25
<b>Tabla 3-2:</b>	Estudio de velocidad y distancias de frenado en camiones.....	25
<b>Tabla 4-2:</b>	Resultados de caculos en base a las fórmulas anteriormente propuestas de velocidad, energía cinética, fuerza y aceleración.....	26
<b>Tabla 5-2:</b>	Velocidades, radios mínimos y peraltes en carretera. ....	27
<b>Tabla 6-2:</b>	Información generada de los modelos establecidos. ....	30
<b>Tabla 7-2:</b>	Características asignadas para cada material utilizados en las simulaciones.....	32
<b>Tabla 1-3:</b>	Comparación de resultados de presión con aceleración de frenado.....	47
<b>Tabla 2-3:</b>	Comparación de resultados de presión con aceleración de giro. ....	47
<b>Tabla 3-3:</b>	Comparación de resultados de velocidad con aceleración de frenado. ....	48
<b>Tabla 4-3:</b>	Comparación de resultados de velocidad con aceleración de giro.....	49
<b>Tabla 5-3:</b>	Valores mínimos de comparación entre modelos y en bases a aceleración de frenado y de giro. ....	49
<b>Tabla 6-3:</b>	Valores resultantes de presión y velocidad con aceleración de frenado y aceleración de giro. ....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Proceso de extracción de petróleo. ....	6
<b>Figura 2-1:</b>	Terminales y Depósitos de Petro comercial en el Ecuador. ....	10
<b>Figura 3-1:</b>	Tanque de acero pintado horizontal de segunda mano de 120m3. ....	13
<b>Figura 4-1:</b>	Remolque cisterna. ....	13
<b>Figura 5-1:</b>	Semirremolque cisterna. ....	13
<b>Figura 6-1:</b>	Semirremolque cisterna acoplado a un tracto-camión. ....	14
<b>Figura 7-1:</b>	Quinta Rueda de un tracto-camión. ....	14
<b>Figura 8-1:</b>	King-ping de un semirremolque cisterna. ....	14
<b>Figura 9-1:</b>	Semirremolques de 1 eje tipo tanque. ....	15
<b>Figura 10-1:</b>	Semirremolques cisterna de dos ejes con tanque elíptico para capacidad de 10000 galones. ....	15
<b>Figura 11-1:</b>	Semirremolques cisternas de tres ejes. ....	16
<b>Figura 12-1:</b>	Análisis de la dinámica de fluidos de un tráiler cisterna utilizando CFD. ....	18
<b>Figura 13-1:</b>	Fenómeno de chapoteo al frenan el vehículo, simulación computación por el método DEM. ....	19
<b>Figura 14-1:</b>	Movimiento de la onda superficial del líquido. ....	20
<b>Figura 15-1:</b>	Rompeolas utilizados en el autotransporte de combustibles ....	20
<b>Figura 16-1:</b>	Camión cisterna para el transporte de leche. ....	21
<b>Figura 17-1:</b>	Comportamiento de método Lagrangiano. ....	21
<b>Figura 18-1:</b>	Comportamiento de método Lagrangiano. ....	22
<b>Figura 19-1:</b>	Comparativo método Langrangiano, Euleriano y ALE. ....	22
<b>Figura 1-2:</b>	Diseño anti-chapoteo propuestos. ....	24
<b>Figura 2-2:</b>	Vista isométrica solida de auto-tanque destinado al transporte combustibles... ..	28
<b>Figura 3-2:</b>	Dimensiones generales del tracto-camión y tanquero de combustible. ....	28
<b>Figura 4-2:</b>	Calculo del nivel del combustible en tanquero para 10000 galones. ....	29
<b>Figura 5-2:</b>	Modelos distribuidos en nodos para las diferentes simulaciones. ....	29
<b>Figura 6-2:</b>	Descomposición de un tanque cisterna, representado en elementos. ....	30
<b>Figura 7-2:</b>	Carta de control *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID ....	31
<b>Figura 8-2:</b>	SPC en la estructura de la cisterna. ....	31
<b>Figura 9-2:</b>	Carta de control *EOS_MURNAGHAN ....	32
<b>Figura 10-2:</b>	Carta de control *LOAD_BODY_Z ....	34
<b>Figura 11-2:</b>	Carta * CONTROL ALE. ....	34

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b>	Parámetro de la gravedad. ....	33
<b>Gráfico 2-2:</b>	Parámetro de frenado.....	33
<b>Gráfico 3-2:</b>	Parámetro de giro .....	33
<b>Gráfico 1-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco).....	35
<b>Gráfico 2-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo B (Triangular).....	36
<b>Gráfico 3-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones separadas). ....	37
<b>Gráfico 4-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones). ....	37
<b>Gráfico 5-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de giro.....	38
<b>Gráfico 6-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de giro.....	39
<b>Gráfico 7-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de giro.....	39
<b>Gráfico 8-3:</b>	Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de giro. ....	40
<b>Gráfico 9-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de frenado. ....	41
<b>Gráfico 10-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de frenado. ....	41
<b>Gráfico 11-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de frenado.....	42
<b>Gráfico 12-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de frenado. ....	43
<b>Gráfico 13-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de giro.....	44
<b>Gráfico 14-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de giro.....	44
<b>Gráfico 15-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de giro. ....	45

<b>Gráfico 16-3:</b>	Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de giro. ....	45
<b>Gráfico 17-3:</b>	Grafica comparativa de presiones respecto a la aceleración de frenado. ....	46
<b>Gráfico 18-3:</b>	Grafica comparativa de presiones respecto a la aceleración de giro. ....	47
<b>Gráfico 19-3:</b>	Grafica comparativa de velocidades respecto a la aceleración de frenado. ....	48
<b>Gráfico 20-3:</b>	Grafica comparativa de velocidades respecto a la aceleración de giro. ....	48

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: INTRODUCCIÓN Y TITULO I DEL ACUERDO MINISTERIAL NO. 18**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento en condiciones dinámicas de un tanquero de grandes dimensiones para el transporte de combustible, mediante simulaciones CAE (Ingeniería Asistida por Computador) utilizando el método computacional transitorio de interacción fluido-estructural. Se plantó realizar dos condiciones de simulación para ver el efecto *sloushing* del combustible, la primera condición es verificar el comportamiento del fluido del combustible introduciendo valores para las condiciones de frenado brusco longitudinal del camión y la segunda condición es ver el comportamiento del fluido al producirse un giro brusco al tomar una curva. Los ensayos virtuales realizados en el software LS-DYNA están compuestos por dos grupos para las distintas condiciones en el evento de sloushing. Cada grupo conformado por cuatro modelos desde A hasta la D que representan los modelos de atenuadores al movimiento del fluido. Las simulaciones realizadas mediante metodología ALE (Euleriano Lagrangiano Arbitrario) permitieron obtener datos y verificar que los diseños propuestos proyecten valores de disminución del fenómeno de *sloushing*. Dentro de los resultados se consideró los valores máximos en presión y velocidad, en la cual al comparar los valores del modelo se pudo observar que el modelo con menor valor dentro de los máximos valores para aceleración de frenado y de giro se seleccionó el modelo más idóneo en base a sus valores que relacionan la geometría en la cisterna para el caso de estudio. Al finalizar se concluyó que modelos con mayor superficie en la sección transversal reducen el fenómeno analizado y se recomienda el método computacional CAE con el método ALE para reducción de recursos económicos y físicos.

**Palabras clave:** < EULERIANO LAGRANGIANO ARBITRARIO (ALE)> <INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE)> <TANQUE DE COMBUSTIBLE> < SLOUSHING> <TRANSPORTE DE CARGAS PELIGROSAS>

0910-DBRA-UPT-2022



## SUMMARY

The present research work aimed to analyze the behavior in dynamic conditions of a large tanker for the transportation of fuel, using CAE (Computer Aided Engineering) simulations using the transient computational method of fluid-structural interaction. Two simulation conditions were proposed to see the sloshing effect of the fuel. The first condition is to verify the behaviour of the fuel fluid by introducing values for the conditions of longitudinal hard braking of the truck. The second condition is to see the behaviour of the fluid when a sharp turn occurs during cornering. The virtual tests carried out in the LS-DYNA software are composed of two groups for the different conditions in the sloshing event. Each group consists of four models from A to D representing the models of attenuators to the movement of the fluid. The simulations carried out using the ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) methodology allowed to obtain data and verify that the proposed designs project decreasing values of the *sloshing* effect. Within the results, the maximum values for pressure and speed were considered. Consequently, when comparing the model values, it could be observed that the model with the lowest value within the maximum values for braking and turning acceleration was the most suitable model based on its values that relate the geometry in the tank for the case study. It was concluded that models with larger cross-sectional area reduce the analysed phenomenon. Finally, the CAE computational method is recommended with the ALE method to reduce economic and physical resources.

**Keywords:** <DYNAMIC CONDITIONS>, <COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE)>, <FUEL TANKING>, <ALE (ARBITRARY LAGRANGIAN-EULERIAN) METHODOLOGY>, <SLOSHING>, <TRANSPORTATION OF HAZARDOUS CARGOES>.



**Lic. Angela Cecibel Moreno Novillo**

**060260393-8**

## INTRODUCCIÓN

Muchos años atrás para el transporte de materiales pesados se implementaba la rueda, que al pasar de los años ayudo al complemento del transporte terrestre como bicicletas, motocicletas, el ferrocarril y más avanzados los automóviles. Históricamente el transporte se inició por el arrastre de fuerza animal y fue hasta 1769 que se construyó el camión a vapor con una velocidad máxima de 6 km/h, viéndose estas limitaciones Karl Benz creó el primer camión de combustión interna de la historia en 1895, con una capacidad máxima de 2 toneladas, en la segunda guerra mundial se implementó estos camiones con neumáticos de caucho, los motores pasaron a ser de 8 cilindros y fue entonces que se los denominó “camiones pesados” (Movertis, 2020, p.18).

La empresa “Man” en 1883 invento el motor a Diésel que se generalizó en 1930, saliendo al mercado en 1933 con un motor de clase 8, el tiempo ha cambiado y también los camiones pesados, siendo así que para la actualidad tenemos camiones de diferentes marcas, diferentes capacidades y con características que los diferencian unos de otros (Movertis, 2020, p.20).

El país tuvo su apareamiento de petróleo en 1911 en Santa Elena, entre 1925 y 1928 se comenzó la comercialización y exportación del crudo en cantidades mínimas, luego del agotamiento del petróleo se realizó nuevas búsquedas de pozos petroleros que dieron fruto en la Amazonia Ecuatoriana. En la actualidad Ecuador tiene su entidad que maneja todo el ámbito hidrocarburífero del país, siendo esta entidad la encargada del control de manejo de las refinerías y transporte de los derivados del crudo por medio de oleoductos hasta las terminales y de allí hasta las estaciones distribuidoras de combustibles por medio de camiones cisternas o más conocidos como tanqueros de combustible.

La era espacial surge en la década de los 60 y con ello los diversos estudios sobre optimización tanto de almacenamiento como de transporte de combustibles líquidos. Estados Unidos y la Unión Soviética se unieron para crear divisiones enfocadas al estudio de la interacción fluido-estructura presentes en los tanques de almacenamiento de combustible que sufrían fallas drásticas en lanzamientos de los vehículos espaciales (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio; citado en Bruno L., 2013, p.11).

En esa década la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), requirió al departamento de Ciencias Mecánicas *Southwest Research Institute* (SwRI) líder en el estudio del fenómeno de oleaje toda la información posible sobre ello y aspectos relacionados (Dodge, 2000; citado en Gallegos C. et al., 2006, p.5).

El sector hidrocarburífero en muchos países representa un gran porcentaje del Producto Interno bruto (PIB), siendo la base de su economía. Ecuador es un país rico en petróleo, se dedica a procesarlo generando derivados como el combustible para el consumo interno. Este sector es de suma importancia para los medios de transporte, proporciona materia prima para su funcionamiento. La necesidad de combustible día a día en el país presenta una alta demanda, pues

esta materia prima es prioridad es algunos sectores de trabajo en el país, empezando por la agricultura hasta la movilidad en las grandes ciudades. Es por esto que el transporte de combustible en el país es constante y regular. Para esto surge la necesidad de tanques contenedores de diversas dimensiones, modalidades y tipos; pues deben cubrir el requerimiento de combustibles de todo un país. Es importante mencionar que en el país existen tanques contenedores que pueden trasladar hasta 10000 galones. Estos tanques pueden llegar a tener hasta 6 cámaras contenedoras con el objetivo principal de transportar variedad de combustibles más no para disipar fenómenos en el transporte de líquidos. El descuido a la seguridad del sector del transporte en el país es preocupante, pues no exigen normas para el traslado de líquidos peligrosos. Mediante indagaciones de accidentes producidos en los últimos doce meses en el país que involucran tanqueros de combustible, se analizaron los accidentes que presentaron muertes de personas los mismos que están detallados en la tabla y figura 1-0. Debido a que éstos perdieron pista sin necesidad de impacto con un obstáculo u otro vehículo, se puede inducir que los vehículos perdieron el control de manejo debido al fenómeno de chapoteo del combustible. En muchos casos los vehículos después de impactarse producen derrames de combustible que muy posiblemente terminan en incendios, estos accidentes pueden involucrar a otros autos, peatones e infraestructuras que se encuentre alrededor de la zona del accidente, por esta razón estos vehículos se pueden considerar peligrosos y se debe auditar su fabricación e importación por medio de autoridades competentes.

**Tala 1.** Accidentes con tanqueros en los últimos 12 meses.

Lugar del accidente	Personas heridas	Personas muertas	Observación
Av. Simón Bolívar	1	1	Impacto frontal con otro vehículo
Kilómetro 5 vía Daule	2	1	Explosión de tanquero, volcadura
Panamericana Norte sector del puente de Guayllabamba	5	1	Se produjo por una volcadura y colisionaron 3 autos mas
Av. Simón Bolívar	4	0	Volcadura y colisión con un vehículo

**Fuente:** (el comercio, 2020)(eltelegrafo, 2020) (eluniverso, 2020)

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.



**Figura 1.** Vuelco producido en carretera Panamericana

**Fuente:**(eluniverso, 2020).

Los camiones cisternas cuentan con sistemas que tienen como finalidad disipar o frenar el efecto de *sloshing* de combustible al momento de su transporte, pero ninguno de estos componentes ha sido analizado para verificar su buen funcionamiento. Por esta razón en este proyecto se desea analizar estos sistemas y así comprobar su funcionalidad, además se propondrá un diseño estándar que proporcione los mejores resultados para la reducción del *sloshing* como se muestra en las figuras 2-0 y 3-0 algunos sistemas que se utilizan para reducir el chapoteo de combustible al ser transportado.



**Figura 2.** Sistema tradicional de espejos estructurales para disipar el fenómeno de chapoteo de combustible.

**Fuente:**(SAFERACK, 2020).



**Figura 3.** Sistema de balones para disipar efecto de chapoteo de combustible.

**Fuente:** (blog.enduraplas, 2020).

Los recursos computacionales han sido una de las herramientas principales dentro de la industria automotriz que ha adoptado el CAE para asegurar la funcionalidad de los componentes de forma virtual antes de ser producidos, la seguridad de los vehículos y componentes se valida mediante ensayos que representan los fenómenos físicos a los que se exponen durante el desempeño; El CAE ha representado los ensayos mediante metodologías virtuales teniendo resultados semejantes a los ensayos realizados de forma real. La metodología ALE al ser un método de representación fluido y estructura ha sido adoptado en las metodologías de simulación computacional para el análisis de la interacción.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Planteamiento del problema

El desconocimiento del comportamiento dinámico y mecánico de un tanquero de combustible en condiciones reales y la inexistencia de normativas nacionales implementadas que regulen y controlen a los fabricantes de tanqueros causa la construcción de los tanqueros de manera empírica, solo en base de la experiencia. En conjunto la falta de recursos invertidos por parte del gobierno para investigaciones en seguridad vial y la flexibilidad de controles referente a seguridad para importaciones de tanqueros de combustible. Además, la poca iniciativa e interés en temas de seguridad vial por parte de autoridades y universidades; no existen estudios que investiguen el comportamiento del combustible en especial el comportamiento de chapoteo. Dejando en efecto que no se conoce el comportamiento del combustible en tanqueros.

La movilidad de líquidos en este caso de combustibles, genera varios fenómenos dentro del contenedor, el comportamiento entre fluido- estructura no tiene evidencia científica o estudios de relevancia en el país, pues la dinámica al momento del transporte de combustibles genera un fenómeno llamado Chapoteo o “sloushing”, que altera la estabilidad de la estructura y por ende de la maquina tractora en movimiento y el inexistente proceso de homologación de los diseños de tanqueros en el país, no permite la revisión y verificación de componentes estructurales como dimensiones, perfiles, espesores, tipos de materiales, cordones de soldadura, ensayos para verificar la conformidad de la resistencia de las estructuras, criterios que sirve para precautelar la seguridad de las personas. Por lo que se consideran estos vehículos altamente peligrosos que pueden atentar la vida de las personas, debido a que no se conoce las condiciones del tanquero. Estos fenómenos pueden tener efectos en un diseño de un tanquero poco resistente a condiciones dinámicas extremas, provocar inestabilidad del vehículo y accidentes de vuelco, impactos de todo tipo, demora en el frenado, mayor consumo de combustible. El sobrepeso en ejes de tracción puede provocar daño prematuro en neumáticos, mecanismos, ejes y otros componentes de tracción. Además, las pérdidas económicas y contaminación ambiental provocado por la ineficiencia del vehículo.

### 1.2. Justificación

La justificación de este trabajo de investigación se enfoca en el análisis del comportamiento del fluido de combustible en condiciones de funcionamiento del automotor, las resistencias y la

disipación de cargas del fluido de combustible debido al fenómeno de *sloshing* mediante simulación mecánica CAE (Ingeniería Asistida por Computador), lo cual permitirá observar el comportamiento del fluido y la estructura durante su interacción.

Estudiar el comportamiento de los combustibles en movimiento es de suma notabilidad. El descuido a la seguridad del sector del transporte en el país es preocupante, pues no exigen normas para el traslado de líquidos peligrosos. Además, Ecuador es un país con una geografía exorbitante por sus cordilleras, a consecuencia de esto la dinámica fluido - estructura es más pronunciado. Los resultados serán de gran relevancia para el diseño y fabricación de cisternas para el transporte de combustibles.

### **1.3. Objetivo**

#### ***1.3.1. Objetivo general.***

Analizar el comportamiento en condiciones dinámicas de un tanquero de grandes dimensiones, para el transporte de combustible, utilizando el método computacional transitorio de interacción fluido-estructural.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Recrear un fichero 3D en software CAD de una cisterna de combustible con capacidad máxima permitida en el país.
- Analizar tres sistemas para disipar el sloshing producido en el transporte de combustible, verificando el comportamiento de los sistemas más utilizados en la fabricación de este tipo de vehículos, empleando software CAE de interacción fluido-estructural.
- Establecer condiciones dinámicas de movimiento como frenado y giro del vehículo para simular la interacción del fluido con la estructura mediante mecánica computacional.
- Determinar un sistema eficiente y seguro que disipe el sloshing de combustible al ser transportado y comprobar su comportamiento utilizando software CAE, aplicando métodos computacionales de interacción fluido-estructural.

### **1.4. Hipótesis**

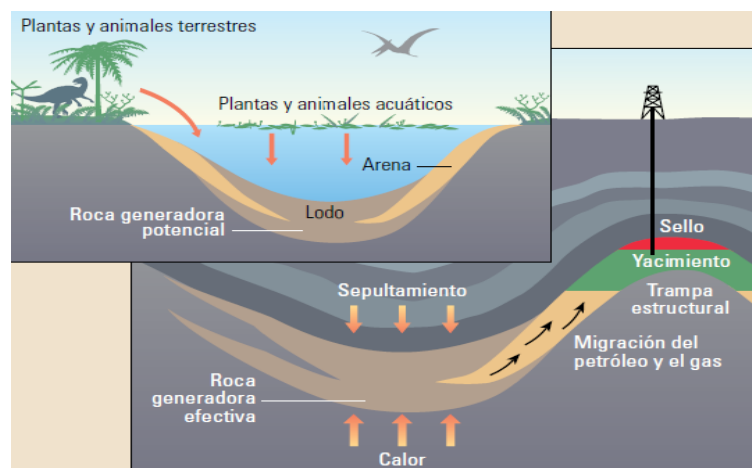
Las condiciones extremas de manejo de los tanqueros de combustible como tomar una curva cerrada y sinuosa, frenar y arrancar bruscamente, al sobrepasar obstáculos de carretera de grandes dimensiones, entre otras condiciones de manejo, contribuyen claramente a que se produzca

grandes presiones y velocidades en diferentes áreas del contenedor, provocando el fenómeno de *sloshing* a gran escala. Este fenómeno puede ser la causa de la inestabilidad del vehículo pudiendo producir accidentes viales.

### 1.5. Estudio del sector hidrocarburofero

Los hidrocarburos no es una materia prima ordinaria, al contrario, están inmersos al interés colectivo del mercado con regulaciones de derecho público en lo más alto de su cumbre. El soportar una carga energética elevada es una de sus características que los hace indispensable para el consumo energético. Su extracción, transformación, transportación y distribución, requieren de grandes capitales, por lo cual se formaron gigantescas empresas que han hecho de los hidrocarburos un negocio extremadamente lucrativo en el mundo (Silva, 2006; citado en Páez, 2017, p.30).

Como es de conocimiento existen lugares donde se encuentran los pozos naturales de hidrocarburos, para lo cual los geólogos se ayudan de imágenes en 3D para localizar y analizar su volumen, a raíz de este método científico existe gran éxito en las perforaciones (Páez, 2017, p.29).



**Figura 1-1.** Proceso de extracción de petróleo.

Fuente: (Stewart L., 2011; citado en Páez, 2017).

#### 1.5.1. Antecedentes Históricos de la explotación de hidrocarburos en el Ecuador

En épocas muy antiguas en el Ecuador, los indígenas narraban que encontraron un elemento con las características del petróleo, el cual brotaba de la tierra naturalmente, estos son los primeros indicios de petróleo en Ecuador, años después se dio:

En Santa Elena fue descubierto el primer pozo petrolero del país, la producción a niveles comerciales se dio en el año 1925 y la exportación en 1928, aunque en pocas cantidades. Entre los años 1928 y 1957, el país exportó 42 millones de barriles de crudo. Sin embargo, en esos años varias compañías extranjeras como Shell, Estándar Oil, California Oil, Tennessee, y la Western

Geophysical Co, obtuvieron más de 5 millones de hectáreas en nuevas concesiones para realizar exploraciones petroleras tanto en el litoral ecuatoriano como en la zona amazónica. (Breve reseña sobre la historia petrolera del Ecuador; citado en Cecilia, 2015, p. 8)

En un principio la explotación de este recurso en el país fue mínima, ya que no se contaba con la tecnología para la ubicación y excavación del crudo, es así que se necesitó de compañías extranjeras reduciendo los ingresos por la materia prima.

En 1967 los pozos petroleros de Santa Elena estaban casi vacíos, dando lugar a la búsqueda de otros pozos en el país. Fue así que en el mismo año en el oriente ecuatoriano exactamente en Lago Agrio se encontró más pozos de petróleo, dando lugar nuevamente al interés de compañías extranjeras, lamentablemente la explotación no fue de forma responsable, dejando secuelas en el medio ambiente como la contaminación de aire, aguas, ecosistemas y dejando a las comunidades ancestrales en condiciones deplorables que se lo logra palpar hasta la actualidad. No fue hasta el 27 de septiembre, en la presidencia de Velasco Ibarra que se proclamó al petróleo como riqueza del país con la ley de Hidrocarburos. En 1977 CEPE compro a Gulf su participación, ganando el 62,5 % del consorcio (Breve reseña sobre la historia petrolera del Ecuador; citado en Cecilia, 2015, p. 9).

El prejuicio de empresas extranjeras en el país siguió su camino, no se encontraba solución al abuso y daño que dejaban atrás, no hasta la Presidencia de Rafael Correa en el año 2007 que:

En este mismo año se renegociaron los contratos petroleros con la Hispano- Argentina Repsol, la francesa Perenco, la Brasileña Petrobras, la china Andes Petroleum y la compañía de capital estadounidense afincada en Panamá, City Oriente. A pesar de la propuesta inicial publicada mediante decreto presidencial, en el cual se señalaba que Ecuador negociaría una ganancia del 99 % frente al 1% del precio diferencial fijado en el contrato de concesión, el acuerdo final fue el cambio de naturaleza del contrato que pasó a ser un contrato de prestación de servicios, en que el estado paga por la extracción de crudo tras la presentación de las facturas, además de someter eventuales divergencias a un centro de mediación en Chile. (Guaranda, La necesidad imperiosa de reformar una Ley Caduca; citado en Cecilia, 2015, p.11) Tras renegociaciones con empresas extranjeras el petróleo dejó de ser una pérdida para el país, generando mayores ingresos internos.

### ***1.5.2. La industria y comercio hidrocarburífero en el Ecuador***

Los hidrocarburos desde tiempos de antaño viene ocupando un puesto importante para la riqueza del país, es así que “representan más del 85% de nuestras fuentes de energía primaria e históricamente han aportado entre el 5% y 16% al PIB. Son la fuente más inmediata y significativa de divisas del país” (Paz H., 2020).



### 1.5.3. Producción Nacional de Petróleo

El país ha tenido un declive en la producción de petróleo en comparación a años anteriores, pero aun así el país puede producir cantidades altas como lo indica la tabla 1-1 y 2-1, siendo así que “La producción nacional de petróleo para 2019 fue de 193.8 millones de barriles, igual a una producción promedio diaria de 531.0 miles de barriles, 2.7% más que lo producido diariamente en 2018, pero levemente inferior en 0.1% a la de 2017 (Banco Central del Ecuador, 2019, p.2).

**Tabla 1-1.** Producción nacional de petróleo por millones de barriles.

Periodo	2017	2018	2019	Variación 2019-2017	Variación 2019-2018
Primer Trimestre	48.06	46.11	47.61	-0.9%	3.3%
Segundo Trimestre	48.57	47.00	48.28	-0.6%	2.7%
Tercer Trimestre	49.26	48.22	50.25	2.0%	4.2%
Cuarto trimestre	48.04	47.47	47.68	-0.8%	0.4%
Total anual	139.9	188.8	193.8	-0.1%	2.7%

Fuente: (citado en Banco Central del Ecuador, 2019, p.2).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 2-1.** Producción nacional de petróleo por miles de barriles.

Periodo	2017	2018	2019	Variación 2019-2017	Variación 2019-2018
Primer Trimestre	534.01	512.28	528.99	-0.9%	3.3%
Segundo Trimestre	533.72	516.44	530.58	-0.6%	2.7%
Tercer Trimestre	535.42	524.11	546.16	2.0%	4.2%
Cuarto trimestre	522.19	516.01	518.23	-0.8%	0.4%
Total, promedio diario	531.31	517.24	531.00	-0.1%	2.7%

Fuente: (citado en Banco Central del Ecuador, 2019, p.2).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 1.5.4. Producción Nacional de derivados del Petróleo

En el Ecuador existen varias refinerías de petróleo para la obtención de sus derivados, tales como lo son la refinería de Esmeraldas, la Libertad y Amazonas (shushufindi), las cuales procesan una cantidad de crudo al año, “durante 2019 la refinería Esmeraldas procesó 31.80 millones de barriles de petróleo, la Refinería La Libertad procesó durante 2019 un volumen igual a 13.56 millones de barriles de petróleo”. Claro que no olvidaremos la refinería Amazonas, donde “El volumen anual procesado en 2019 fue de 6.71 millones de barriles de crudo” (Banco Central del Ecuador, 2019, p.10).

#### 1.5.4.1. Combustibles líquidos derivados del petróleo en Ecuador

Como la palabra dice un combustible es un elemento que al interactuar con fuego o presión alta este arde produciendo calor, por tanto, cuando hablamos de combustible líquido, estamos tratando

de una sustancia inflamable, la cual “tiene un punto de encendido de no más de 60.5°C (141 °F) o que tenga un punto de ignición sobre los 38 °C (100 °F)”. Tanto como el diésel, fueloil y gasolina, son considerados combustibles líquidos, los cuales presentan una clasificación “dentro de la clase 3, así como también se tiene una clasificación según el grado de peligro de la sustancia a trasportar basado en (Enríquez A. & Salvador F., 2014, p.34):

Grupo I: Alto peligro.

Grupo II: Medio peligro.

Grupo III: Bajo peligro.

**Tabla 3-1.** Clasificación de los tipos de combustibles, según CFR.

Combustible	Clase	Grupo de Envase	Requerimientos especiales
Diesel	3	III	B1
Fueloil	3	III	B1
Gasolina	3	II	B33
Asfalto	3	III	

**Fuente:** (Condo y Salas, 2006; citados en Enríquez A. & Salvador F., 2014, p.35).

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

La oferta de derivados constituye una base económica para el país, por lo que existe una demanda interna del mismo. “El derivado con mayor demanda continúa siendo el diésel (8.26 millones de barriles), seguido por la gasolina (7.56 millones de barriles) y el gas (3.59 millones de barriles). El diésel es usado principalmente como combustible para el parque automotor de carga y el transporte público.” (Banco Central del Ecuador, 2019, p.26).

**Tabla 4-1.** Demanda de derivados de petróleos por millones de barriles.

Mes	Año	Gasolina	Diésel	Glp	Otros	Total
I Trimestre	2017	6,85	7,40	3,03	3,05	20,33
II Trimestre		7,07	7,60	3,23	3,03	20,93
III Trimestre		7,35	8,14	3,33	3,29	22,11
IV Trimestre		7,55	8,20	3,39	4,07	23,20
TOTAL		28,82	31,34	12,97	13,43	86,56
I Trimestre	2018	7,26	7,67	3,18	3,94	22,05
II Trimestre		7,47	8,19	3,37	3,93	22,97
III Trimestre		7,64	8,44	3,49	4,01	23,57
IV Trimestre		7,92	8,71	3,45	4,51	24,59
TOTAL		30,28	33,02	13,49	16,39	93,18
I Trimestre	2019	7,32	7,86	3,22	3,90	22,30
II Trimestre		7,56	8,20	3,49	3,50	22,75
III Trimestre		7,72	8,65	3,66	3,71	23,74
IV Trimestre		7,56	8,26	3,59	2,80	22,22
TOTAL		30,16	32,96	13,97	13,92	91,00

**Fuente:** (EP PETROECUADOR; citado en Banco Central del Ecuador, 2019, p.27).

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 1.5.5. Almacenamiento de derivados de petróleo

En el país existen terminales que reciben derivados del petróleo por poliductos, las cuales constan de sistemas de recepción, almacenaje y despacho de combustibles de grandes dimensiones para la demanda interna, en los cuales se depositan: Gasolina extra y súper, diésel 1 y 2, destilados, jet fuel, gasolina de aviación (avgas) y gas (GLP). A lo largo del país existen 12 terminales: Lago Agrio, Esmeraldas, El Beaterio, Sto Domingo de los Tsáchilas, Ambato, Manta, La libertad, Pascuales, El Salitral, Fuel Oil, Tres Bocas y Baltra, como se muestra en la figura (Andrade F., 2007, p.26).



**Figura 2-1.** Terminales y Depósitos de Petro comercial en el Ecuador.

Fuente: (Andrade F., 2007, p.27).

El 26 de septiembre fue fundada Petrocomercial filial de Petroecuador, la cual cumple con la misión de abastecer de los derivados del petróleo tanto en transporte, almacenaje y comercialización en todas las regiones del país (Andrade F., 2007, p.25).

### 1.5.6. Demanda interna de combustibles

La demanda de los derivados del crudo en el país es muy grande, más tratándose de que el parque automotor va en vías en crecimiento, y por tanto se necesita el abastecimiento de los derivados que son más utilizados por los vehículos, como se figura en la tabla 5-1.

**Tabla 5-1.** Consumo interno de derivados de petróleo diarios por barriles.

Combustibles	2018	2019	Variación
Super	11.633	7.605	-34.6%
Extra	34.250	35.616	4.0%
Eco-país	37.090	39.398	6.2%
Diésel	90.453	90.308	-0.2%
Glp	36.967	38.263	3.5%

**Fuente:** (Torres W. & Guerra S., 2021).

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### **1.5.7. Transporte de combustibles**

Con el dato de la tabla 4-1, podemos decir que la cantidad de combustible transportado por todo el país es muy grande, por lo que significa la utilización a gran escala de elementos en este caso de auto tanques de gran capacidad para el traslado de combustibles desde las terminales hasta las distribuidoras existentes en el país.

Al tratarse de una actividad de traslado de sustancias peligrosas, se designa ciertos e importantes parámetros que en este caso la cisterna o auto-tanque debe cumplir, para poder realizar su función sin presentar riesgo alguno, entre estas tenemos las siguientes disposiciones generales, que son:

1. Las unidades operacionales de PETROECUADOR que se dedican al transporte de combustibles y que realizan trabajos de carga y descarga, no deberán tener más de 10 años de su elaboración.
2. Deben llevar consigo las identificaciones principales, que son:  
Capacidad máxima o total en  $m^3$  o galones.  
El logotipo de comercialización, ocupando la parte central tanto en la parte posterior y los costados del tanque (Enríquez A. & Salvador F., 2014, p.55).
3. La capacidad volumétrica del tanque debe estar entre 3000 y 30000 gal.
4. El Autotanque debe tener entre 1 y 6 compartimentos.
5. La capacidad de cada compartimento debe ser la prescrita por el fabricante.
6. La longitud del compartimento debe cumplir con la especificada por el fabricante.
7. Las dimensiones de la sección transversal deben cumplir con la especificada por el fabricante.
8. Las válvulas de alivio deben abrir a no menos de 3 psi (20.7 kPa).
9. Si un autotanque está provisto de venteo, este debe cumplir con:
  - Venteo de Presión - 1psi (6.9 kPa)
  - Venteo de Vacío - 6 oz (168kg)
10. Un autotanque con un espesor de pared menor que 3/8 pulgadas, debe ser circunferencialmente reforzado con anillos de refuerzo, rompe olas, espejos o alguna combinación de ellos, en adición a las cabezas del autotanque.

11. La distancia entre refuerzos no debe exceder de 60 pulgadas.
12. Tanto anillos de refuerzo como rompe olas y espejos no deben presentar defectos tales como abolladuras o hendiduras y defectos de soldadura, caso contrario, estos tipos de defectos deben cumplir con los criterios de aceptación establecidos por la norma API-1104.
13. La soldadura tanto longitudinal como circunferencial no deben presentar defectos, caso contrario, estos defectos deben cumplir con los criterios de aceptación establecidos por las normas establecidas (Enríquez A. & Salvador F., 2014, p.58).

#### ***1.5.8. Estudio de semirremolques y remolques cisterna según la Dirección Nacional de Hidrocarburos***

De acuerdo a la DNH, existían para el 2014 una cantidad de 2404 auto-tanques destinados al transporte de hidrocarburos líquidos, para lo cual existían un 33.19% de total de vehículos con una capacidad de 6000 galones, seguido de aquellos que contienen una capacidad de 10000 galones, representando un 27.37% de total de vehículos (Enríquez A. & Salvador F., 2014, p.51).

Según la DNH, en el país circulan dos tipos generales de auto-tanques destinados netamente para el transporte de combustibles líquidos, el primer grupo hacen referencia a los tanques que están soldados o unidos directamente al chasis del vehículo pesado. El segundo grupo simplemente van remolcados por la maquina tractora (Garzón M. & Salas F., 2006, p.131).

El consumo de combustibles es a nivel mundial, por lo que el transporte de los combustibles hasta las plantas de distribución existirá hasta que el crudo y sus derivados se agoten, hasta que esto pase se necesitara de los remolques y semirremolques, claro está que cada país constara de su ente regulador para el debido control de la movilización de estos líquidos peligrosos, cada regulación cambia debido a sus normas regidas en cada país.

#### ***1.5.9. Definición de cisternas móviles para el transporte de combustibles***

##### ***1.5.9.1. Definición de tanque cisterna de combustible***

El objetivo de un tanque cisterna es contener líquidos a granel para el transporte tanto en camiones, trenes o barcos. Su uso va en crecimiento muy notable, dados por tres motivos, “Dotar al transporte de una mayor seguridad, obtener una mayor rentabilidad al reducir los costes de transporte y permitir una transferencia más rápida de la carga en puestos y terminales” (Malón H. et al., 2017, p.1009).

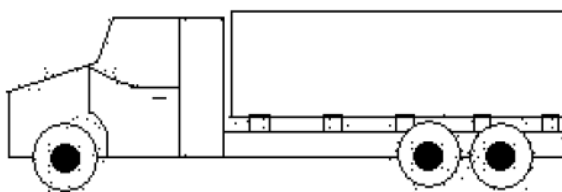


**Figura 3-1.** Tanque de acero pintado horizontal de segunda mano de 120m<sup>3</sup>.

**Fuente:** (Vinimat, s.f.)

#### *1.5.9.2. Definición de remolque cisterna*

Este tipo de remolque es un vehículo que contiene una cisterna, que relativamente está sujeta firmemente a su chasis, sin ruedas propias, es decir, “sin que tenga medios propulsores autónomos” (Garzón M. & Salas F., 2006, p.26).

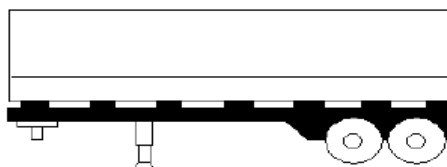


**Figura 4-1.** Remolque cisterna.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p. 26).

#### *1.5.9.3. Definición de semirremolque cisterna*

Siempre provisto por su tanque cisterna, este vehículo pesado, donde, “cuyo peso descansa parcialmente, sobre sus propias ruedas y parcialmente sobre el vehículo tractor” (Garzón M. & Salas F., 2006, p.26).



**Figura 5-1.** Semirremolque cisterna.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.26).

Por encima de tolerar su propio peso, un semirremolque se caracteriza por la capacidad de resistir el peso de las sustancias que transporta, siendo este enganchado a un tracto-camion, teniendo

como finalidad el transporte del semirremolque hasta los diferentes lugares de consumo de los líquidos (Garzón M. & Salas F., 2006, p.27).



**Figura 6-1.** Semirremolque cisterna acoplado a un tracto-camión.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.27).

La máquina tractora o cabezal, se une al semirremolque mediante un elemento denominado quinta rueda (ver fig. 7-1) al “King - ping” (ver Fig. 8-1) unificado a la cisterna para su traslado (Garzón y Salas, 2006, p.28).



**Figura 7-1.** Quinta Rueda de un tracto-camión.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.28).



**Figura 8-1.** King-ping de un semirremolque cisterna.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.28).

#### ***1.5.10. Clasificación de semirremolques cisterna***

La clasificación se basa en el número de ejes, los cuales varían dependiendo a la carga que transporta:

#### 1.5.10.1. *Semirremolque de un eje*

Es más utilizado como vagón, es decir para poca capacidad hasta unas 12 toneladas, sus características como suspensión, número de ruedas y su forma, están determinadas por la cantidad de volumen que desea montar, sus dimensiones máximas son de 9m de largo, 2,6m de ancho y 4.10 de alto. Pudiendo transportar unos 4000 galones (Garzón M. & Salas F., 2006, p.32).



**Figura 9-1.** Semirremolques de 1 eje tipo tanque.

**Fuente:** GUECAM, s.n.

#### 1.5.10.2. *Semirremolque de dos ejes*

La geometría generalmente circular o elipsoidal de la cisterna, la suspensión y el número de ruedas, son las características que regirán la capacidad de este semirremolque, por lo que, están destinados a transportar una capacidad de 8000 a 20000 galones (ver fig. 7) (Garzón M. & Salas F., 2006, p.33).



**Figura 10-1.** Semirremolques cisterna de dos ejes con tanque elíptico para capacidad de 10000 galones.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.33).

#### 1.5.10.3. *Semirremolque de tres ejes*

El transporte pesado es caracterizado por el traslado de grandes masas o volúmenes, siendo así que el semirremolque cisterna de tres ejes:

Se lo utiliza para transportar grandes cantidades de carga, según el MOP (Ministerio de Obras Públicas) y las Normas del Pacto Andino se tiene que la máxima carga a transportar es de 24000



kg. De acuerdo a los requerimientos del usuario y el trabajo específico que éste va a realizar, los ejes a utilizar van aumentando. Este tipo de semirremolque cisterna es empleado generalmente para transportar entre un rango de 10000 a 12000 galones, siendo generalmente la forma geométrica de tanque, circular o elíptica (ver fig. 11-1) (Garzón M. & Salas F., 2006, p.34).



**Figura 11-1.** Semirremolques cisternas de tres ejes.

**Fuente:** (Garzón M. & Salas F., 2006, p.34).

### ***1.5.11. Vehículos para el transporte de combustibles***

Cada tanque cisterna necesita de una maquina tractora para su movilización, siendo así que la DNH clasifica los vehículos de la siguiente manera:

**Tabla 6-1.** Tipo de vehículos para transporte de tanques.

TIPO DE VEHÍCULO	NOMBRE
1	Mula
2	Sencillo
3	Tráiler
4	Mula más remolque
5	Sencillo más remolque
6	Tráiler más remolque

**Fuente:** DIRECCIÓN NACIONAL DE HIDROCARBUROS; citado en Garzón M. & Salas F., 2006.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

En el parque automotor de pesados también existe una infinidad de marcas, como, por ejemplo, Kenworth, International, Mercedes Benz, Hino, etc. Los cuales poseen gran capacidad motora para el remolque de pesos exuberantes.

En Ecuador el Ministerio De Transporte y Obras nos proporciona una regulación que permite el traslado de volúmenes máximos de combustibles líquidos (gasolina, diésel, jet oíl o similares) en tanqueros, ver tabla 7-1 (Solís W., 2016, p. 78).

**Tabla 7-1.** Capacidad máxima para el transporte de combustibles en función del tipo de vehículo tractor.

Tipo de Vehículo	Galones Permitidos
2 DB	4000
3 A	6000
3S2	8000
3S3	10000

Fuente: (Solís W., 2016).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

En especial el tipo de vehículo 3s3, es un vehículo pesado de 3 ejes en el cabezal y 3 ejes en el remolque que puede remolcar una cisterna de grandes medidas.

#### ***1.5.12. Estudio de líquido en movimiento***

El comportamiento del fluido se líquido o gaseoso está inmerso en la materia de Mecánica de fluidos, la cual no es más que el estudio de los fenómenos que se encuentran en los fluidos en movimiento o en reposo (Arreguí et al., 2017, p.11).

Las propiedades que conforman al fluido y que son esenciales para el estudio de su comportamiento son varias, pero entre las elementales están, la velocidad ( $V$ ), la densidad ( $\rho$ ), la presión ( $p$ ) (Arregui et al., 2017, p.23).

Estudiar el movimiento de los fluidos no es una tarea fácil, ya que este comprende un sinnúmero de partículas, más aún que está gobernado por las grandes leyes de la física, podemos describir el movimiento del fluido desde dos bases que son Lagrangiana, que estudia casos de partículas sólidas y la Euleriana, que se enfoca en un punto determinado y en un instante proporcionado (Arregui et al., 2017, p.47).

#### ***1.5.13. Efecto que produce el líquido al ser transportado en camiones cisterna***

Un vehículo que transporta carga líquida presenta afectaciones de estabilidad y rendimiento direccional, esto debido a los momentos y fuerzas causadas por la salpicadura del líquido en instantes de maniobras como frenado o aceleración, siempre en camiones parcialmente llenos (Kolaei et al., 2014, p. 46).

##### ***1.5.13.1. Fuerzas generadas por el movimiento del líquido***

El introducir aceleraciones laterales o longitudinales a un fluido contenido, contribuye a producirse ondulaciones, que generan una carga, la cual puede ser causante de inestabilidades críticas pudiendo producirse fallos en la estructura vehicular o vuelcos. Las maniobras en

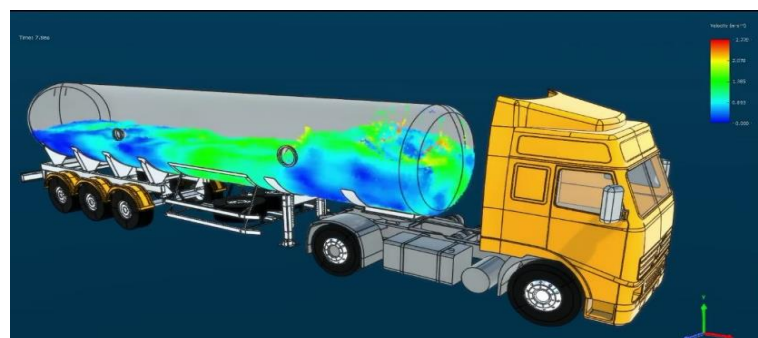
carretera de diferente índole, provocan un impacto hidrodinámico del líquido con las paredes del recipiente, debido a las aceleraciones que se producen en el instante de la conducción (Martín, 2013, pp. 54-55).

El movimiento de líquidos en un recipiente no solo genera fuerzas, si no también presiones, cargas, velocidades, esfuerzos, etc. Los cuales pueden llegar a consecuencias en el contenedor o a su vez a la unidad móvil, como, por ejemplo, ruptura del recipiente, pérdida de estabilidad, etc. El fallo de estas unidades llega a producir derrames o a su vez accidentes fatales que afectan directamente al medio ambiente. Por esto y más factores es precedente el estudio de los fenómenos presentes de los líquidos en movimiento.

#### 1.5.13.2. Efecto sloushing u oleaje

En el transporte de sustancias líquidas, se presenta el fenómeno de sloshing “oleaje o chapoteo”, que no es más el traslado libre del líquido dentro de un contenedor, que al ser sometido a maniobras por parte del camión tractor este desprende fuerzas que interactúan con el tanque-cisterna, afectando la estabilidad lateral y eficiencia de frenado del vehículo, las cuales van de la mano con la seguridad vial (Rakheja, et al, 1992; Aquaro, et al, 1999; Romero, et al, 2002; citados en Romero et al., 2003, p.1).

Al producirse un movimiento brusco del líquido dentro de un recipiente, se producen ondulaciones reconocido como el fenómeno “*sloshing*”, este movimiento produce más aceleraciones de lo común y el traslado del centro de gravedad de masa, conduciendo al posible fallo de estabilidad del contenedor (Bruno et al., 2012, p.1).



**Figura 12-1.** Análisis de la dinámica de fluidos de un tráiler cisterna utilizando CFD.

**Fuente:** (Rubio, 2019).



**Figura 13-1.** Fenómeno de chapoteo al frenar el Vehículo, simulación computación por el método DEM.

**Fuente:** (SCANSCOT, 2019).

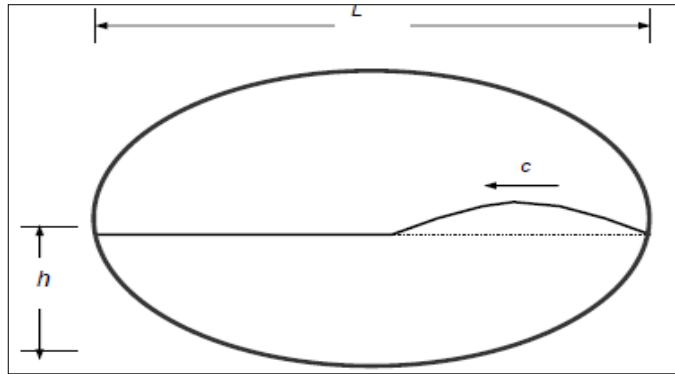
Cuando un vehículo de pequeñas proporciones traslada una carga líquida, es normal que se genere perturbaciones dinámicas por el fenómeno de sloshing en la estructura del vehículo pudiendo hacer que se produzca el fallo de mecanismo de seguridad del vehículo como frenos. Más tratándose de toneladas de líquidos donde se presentará el sloshing en más grandes cantidades y que por el hecho de su cantidad ejercerá más esfuerzos en el contenedor y por ende la mecánica del vehículo.

#### 1.5.13.3. Efecto del nivel de llenado

La Organización Internacional de Metrología (OIML) sugiere que el nivel de llenado de combustible no sea total, debido a las características de expansión y volatilidad del combustible (Gallegos C. et al., 2006, p.9).

El transporte de combustible conlleva cambios climáticos y movimientos dinámicos, por consiguiente, provocan que el combustible genere gases volátiles y expandibles, por lo cual se necesita un espacio adicional en el tanque cisterna que va desde un 4 a 6 % del volumen total de la carga para alojarlos y controlarlos (Gallegos C. et al., 2006, p.9).

El nivel de llenado varía la longitud de onda que se mueven de un lado al otro, de tal manera que la onda se genera en la derecha y al cabo de un instante esta se refleja hacia el otro extremo (ver fig. 13-1) y así hasta su posición original, todo esto bajo las condiciones de altura de llenado  $h$ , la longitud  $L$  (Romero et al., 2003, p.2).



**Figura 14-1.** Movimiento de la onda superficial del líquido.  
**Fuente:** (Romero et al., 2003, p.3)

#### 1.5.13.4. Formas de amortiguar el efecto del oleaje

El implementar un tanque cisterna a un vehículo, puede acarrear factores críticos, si este tanque está parcialmente lleno, este generara olas, las cuales al introducirle un movimiento provocara el traslado de la masa suspendida en dirección del movimiento del líquido. La fuerza que se genera cuando la ola golpea el tanque, puede provocar una pérdida del control del vehículo, volcándolo o deslizándolo al frenar (Martín, 2013, pp.48-49).

Con el fin de reducir estas fuerzas por el oleaje, se puede optar por la instalación de compartimientos o espejos dentro del contenedor, esto con la finalidad de que las fuerzas inerciales se dispersen a lo largo de toda la cisterna, lo más usual es encontrar estos espejos soldados a la misma distancia y de forma transversal. La mayoría de estas particiones poseen orificios que interconectan las divisiones entre sí, con el propósito de que el aire y el líquido fluyan a una velocidad especifica durante el llenado y vaciado (Martín, 2013, p. 49).



**Figura 15-1.** Rompeolas utilizados en el autotransporte de combustibles  
**Fuente:** (Gallegos C. et al., 2006).

El uso de estos elementos disipadores de oleaje no es obligatorio y tampoco general para cargas líquidas, en algunos casos es prohibida. La prohibición no es en base a la estabilidad vehicular, sino a principios de higiene como es el caso de líquidos comestibles (University of Michigan Transportation Research Institute, 2000; citado en Gallegos C. et al., 2006, p. 10).

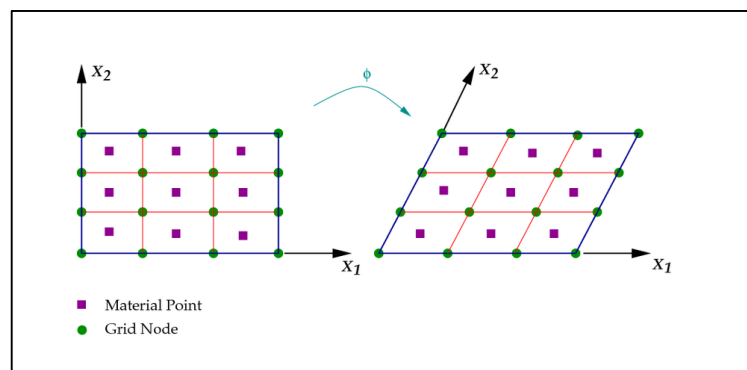


**Figura 16-1.** Camión cisterna para el transporte de leche.

Fuente: (LA ANTIGUA DEFUENTESAÚCO, 2021).

#### 1.5.14. Principios de Algoritmo Lagrangiano

Este método trabaja de forma que cuando se asigna un mallado este se fija al material, es decir que ambos se moverán fijos durante todo el análisis (Mayoral, 2012, p. 20).



**Figura 17-1.** Comportamiento de método Lagrangiano.

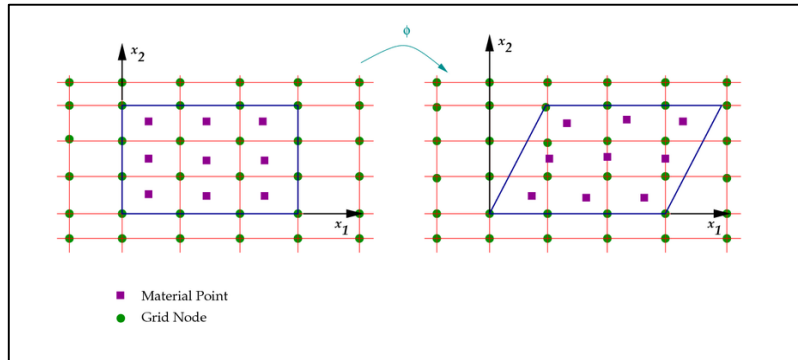
Fuente: (Antón Mayoral , 2012).

En la figura 16-1 se observa que el cuerpo (en azul) y la malla (en naranja) están conjugadas y al moverse el material la malla le sigue el movimiento. Este método es el más óptimo para resolver problemas de mecánica de sólidos, ya que en ello las deformaciones son mínimas y es una característica de esta técnica. Al tratarse de dinámica de fluidos, las deformaciones son muy pronunciadas, por lo que el análisis lagrangiano no es aplicable. Caso contrario en el análisis de malla nos proporcionara errores en los resultados (Mayoral, 2012, p. 20).

#### 1.5.15. Principios de Algoritmo Euleriano

Para un análisis, este método funciona de forma que cuando se produce un movimiento el mallado permanece fijo en el espacio y el material se mueve a través de él, distinto al método lagrangeano (A three-dimensional parallel adaptive mesh refinement method for fluid structure interaction, 2009; citado en Mayoral, 2012, p. 21).

Cuando se genera una deformación o movimiento de un cuerpo, el material ocupara y dejara espacios vacíos en la malla ya existente, por lo tanto, el tamaño de malla para este análisis tiene que superar la mallado del cuerpo para poder contener su traslación, significando un gasto computacional elevado (Mayoral, 2012, p. 21).

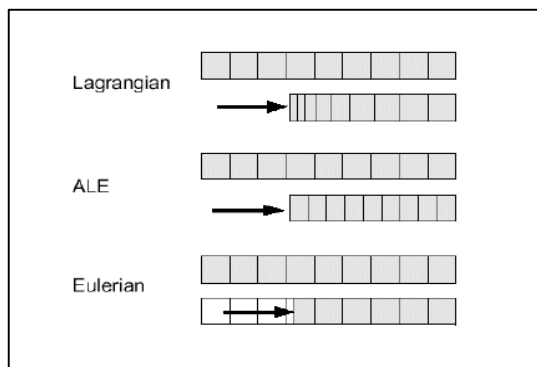


**Figura 18-1.** Comportamiento de método Lagrangiano.  
**Fuente:** (Mayoral, 2012).

Inicialmente existe un mallado (naranja) más grande que rodea al cuerpo (azul), al deformarse la malla permanece fija y el cuerpo se mueve a nuevas zonas, como se observa en la figura 17-1. Este método es excelente para casos de grandes deformaciones o interacción con fluidos (Mayoral, 2012, p. 21).

**1.5.16. Método ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)**

Este método está definido de forma que se adecua a los problemas dados, es decir la malla se divide en partes iguales, optimizando el gasto computacional. Es importante que para el recálculo los algoritmos definidos sean eficientes, para obtener resultados exitosos, para ello son fundamentales dos criterios para el mallado, el primero que regula el mallado evitando distorsiones y el segundo que refina las zonas de mayor interés mediante desplazamientos (Mayoral, 2012, p. 24).



**Figura 19-1.** Comparativo método Lagrangiano, Euleriano y ALE.

**Fuente:** (Mayoral, 2012).

Para el análisis ALE la ecuación de estado de tipo MURNAGHAN, utilizada para para fluidos incompresibles, la misma describe la presión del fluido de combustible de la siguiente manera.

$$p = k_0 \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 - 1 \right]$$

Donde:

$p$  = presión del fluido

$k_0$  = constante

$\rho$  = densidad del combustible

Para modelar los flujos de fluido con precisión, Gamma ( $\gamma$ ) a menudo se establece en un valor de 7, y  $k_0$  se elige de manera que:

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma k_0}{\rho_0}} \geq 10 v_{max}$$

donde  $v_{max}$  es la velocidad máxima esperada del flujo de fluido. Esto asegurará una baja compresibilidad al tiempo que permite un tamaño de paso de tiempo relativamente grande.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

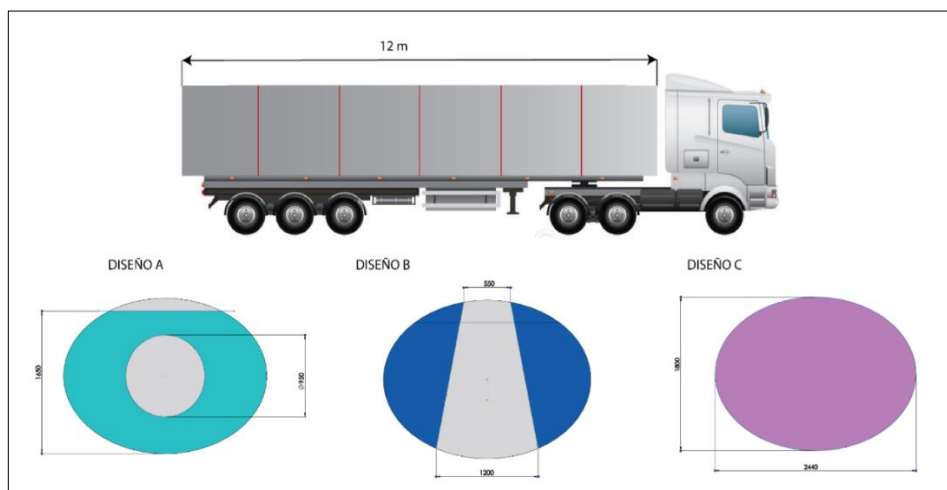
Para la presente investigación se plantea realizar 2 condiciones de simulación para ver el efecto *sloushing* del combustible, la primera condición es verificar el comportamiento del fluido del combustible en condiciones de frenado brusco longitudinal del camión y la segunda condición es ver el comportamiento del fluido al producirse un giro brusco del camión al tomar una curva.

Para analizar los sistemas anti chapoteo (SAC) propuesto se realizará una simulación estructural equivalente a las cargas producidas por el fluido, y así proponer diseños que ayuden a la reducción del *sloushing*. Se realizará las siguientes simulaciones:

**Tabla 1-2.** Simulaciones Propuestas.

N° de simulación	Descripción	Método empleado
Simulación de fluido de combustible para aceleración de frenado		
1	Diseño A-SAC Redondo hueco	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
2	Diseño B-SAC triangular	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
3	Diseño C-SAC divisiones separadas	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
4	Diseño D-SAC sin divisiones	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
Simulación de fluido de combustible para aceleración producida en curva		
5	Diseño A-SAC Redondo hueco	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
6	Diseño B-SAC triangular	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
7	Diseño C-SAC divisiones separadas	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
8	Diseño D-SAC sin divisiones	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.



**Figura 1-2.** Diseño anti-chapoteo propuestos

Fuente: Hernández Jonathan, 2021.

Para poder representar diferentes condiciones de chapoteo del combustible en el tanquero se optará por proponer y simular tres diseños diferentes de divisiones o sistemas anti chapoteo (SAC), los mismos representan los diferentes diseños que se implementan en tanqueros en el país.

**Tabla 2-2.** Dimensiones y características de tanquero de capacidad de 10000 galones.

Denominación	Dimensión
Largo	12,000 m
Ancho	2,440 m
Alto	1,800 m
Capacidad	10000 galones
Número de divisiones	6
Ancho de espejo de división	0,05m
Peso de combustible	25711 Kg
PBV promedio	27000 Kg
Dimensión de separaciones	1,95833 m

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

## 2.1. Condiciones de ensayo

### 2.1.1. Cálculo de aceleración de frenado

Para el cálculo de la aceleración de frenado se investigó en estudios realizados donde se analizan y publica la distancia y tiempo de frenado en camiones, ver tabla 3-2.

**Tabla 3-2.** Estudio de velocidad y distancias de frenado en camiones.

Velocidad m/s	Distancia de frenado para camiones (m)		
	Peor situación de conducción	Mejor situación de conducción	Sistema de frenado de Antibloqueo
8.9408	23.4696	14.6304	11.2776
13.4112	56.6928	35.052	26.8224
17.8816	104.8512	64.9224	52.4256
22.352	163.9824	101.4984	81.3816
26.8224	226.7712	140.8176	114.3
31.2928	308.7624	191.4144	155.448

Fuente: (Fambro, et al., 1997, p.27).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Posteriormente con estos valores calculamos la energía cinética, fuerza de frenado y la aceleración de frenado del camión a diferentes velocidades empleando las ecuaciones detalladas a continuación:

Al producirse el frenado del vehículo este posee una energía cinética que depende de su velocidad (v) y su masa (m), y viene dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Donde partiendo de datos establecidos en la tabla 3-2 y haciendo uso de la fórmula, obtenemos sus valores resaltados en la tabla 4-2. En el caso de un ensayo de frenado, el vehículo deberá disipar completamente esta energía al detenerse que la denominaremos energía disipada (E disipada) que es igual a la energía cinética (Ec) y se cuantifica mediante la fórmula:

$$E_{disipada} = E_c = F \cdot d$$

De la cual despejamos la fuerza (F) que se ejerce sobre el vehículo, para encontrar valores en base a las distancias señaladas en la tabla 3-2 y la energía cinética obtenidas en la tabla 4-2, tenemos la siguiente formula:

$$F = \frac{Ec}{d}$$

La segunda ley de Newton nos dice que:

$$F = m \cdot a$$

De la cual despejamos la aceleración (a), obteniendo la formula siguiente:

$$a = \frac{F}{m}$$

Con este análisis calculamos una aceleración promedio de frenado de 3.2 m/s<sup>2</sup>, ver en tabla 4-2, la misma que será la condición de aceleración que se utilizará en el análisis del combustible al aplicar una aceleración de frenado. Para el cálculo el peso bruto vehicular se consultó en (Res. 097-DIR-2016, 068-DIR-2017) y se seleccionó el valor promedio de 27 000 Kg.

**Tabla 4-2.** Resultados de caculos en base a las fórmulas anteriormente propuestas de velocidad, energía cinética, fuerza y aceleración.

Velocidad (m/s)	Ec (N.m)	F (N)	a (m/s2)
8.9408	1079161.7	95690.7	3.5
13.4112	2428113.9	90525.6	3.4
17.8816	4316646.9	82338.5	3.0
22.352	6744760.7	82878.2	3.1
26.8224	9712455.4	84973.4	3.1
31.2928	13219731.0	85042.8	3.1
Promedio	6250144.9	86908.2	3.2
PBV (Kg)	27000.0		

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 1.1.2 Cálculo de aceleración de giro

La aceleración de giro se calculó en base a lo indicado en la tabla según la normativa NTE INEN 1323:2009, considerando un valor de velocidad de 80 Km/h y con un radio de giro de 250 m, que representa la máxima velocidad que podría experimentar un tanquero de combustible de las dimensiones detalladas en el proyecto.

**Tabla 5-2.** Velocidades, radios mínimos y peraltes en carretera.

Velocidad del vehículo (Km/h)	Radio de curvatura de la carretera (m)	Peralte %
80	250	8
85	300	
90	350	
95	400	
100	450	
105	500	
110	550	
115	600	
120	700	
125	800	
130	900	
135	1050	
140	1250	7.51
145	1475	6.97
150	1725	6.25
		5.49
		4.84
		4.29

**Fuente:** (Norma 3.1-IC; citado en NTE INEN 1323:2009, p.5).

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

Se calcula la aceleración centrífuga con la ecuación detallada a continuación, la misma se aplicará como aceleración de giro de manera transversal al tanquero.

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

Donde la aceleración centrífuga se la calcula en base a la velocidad ( $v$ ) y e radio de giro ( $r$ ).

## 2.2. Procedimiento de ensayo

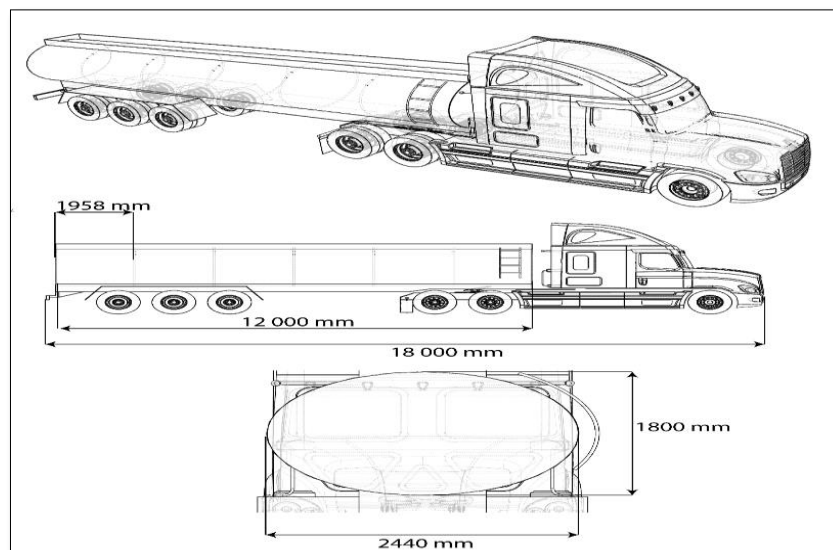
### 2.2.1. Preparación de modelos

El modelo del camión y taquero tienen las siguientes dimensiones, un largo de 18 metros, ancho de 2.44 metros y un alto desde el piso de 4 metros. El tanquero frente al volumen de carga tiene 12 de largo con un ancho de 2.44 y una altura de 1.8 metros, como se indica en la figura 3-2. El tanquero cuenta con 6 divisiones las que están separadas por los sistemas anti chapoteo que cuentan con una separación 1.958 metros entre sí, la capacidad del tanquero es de  $10\ 000 \pm 100$  Galones de gasolina con una densidad de  $680\text{ Kg/m}^3$ , el fuselaje como planchas, tapas externas y recubrimientos metálicos del cilindro del tanquero son de 5 mm de espesor.



**Figura 2-2.** Vista isométrica solida de auto-tanque destinado al transporte de combustibles.

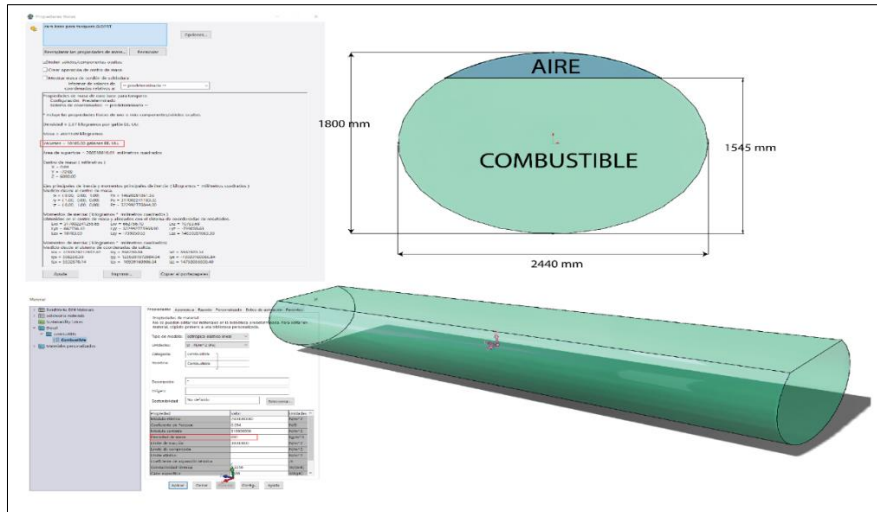
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.



**Figura 3-2.** Dimensiones generales del tracto-camión y tanquero de combustible.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

Después de realizar una investigación de campo de las dimensiones de tanqueros se pudo concluir que las medidas estándar de un tanquero de gran capacidad son de 1.8 m de alto x 2.44 m de ancho y largo de 12 m, con estas dimensiones se modeló el camión cisterna, por otro lado para el cálculo de la dimensión del volumen de combustible y aire en el tanquero se utilizó el programa SOLIDWORKS, con esto se concluye que el 86 % de ocupación de volumen del tanquero es de gasolina mientras que el 14% ocuparía el aire, la altura de la gasolina medida desde la base inferior de la estructura es de 1.545 m como se puede ver en la figura 4-2.

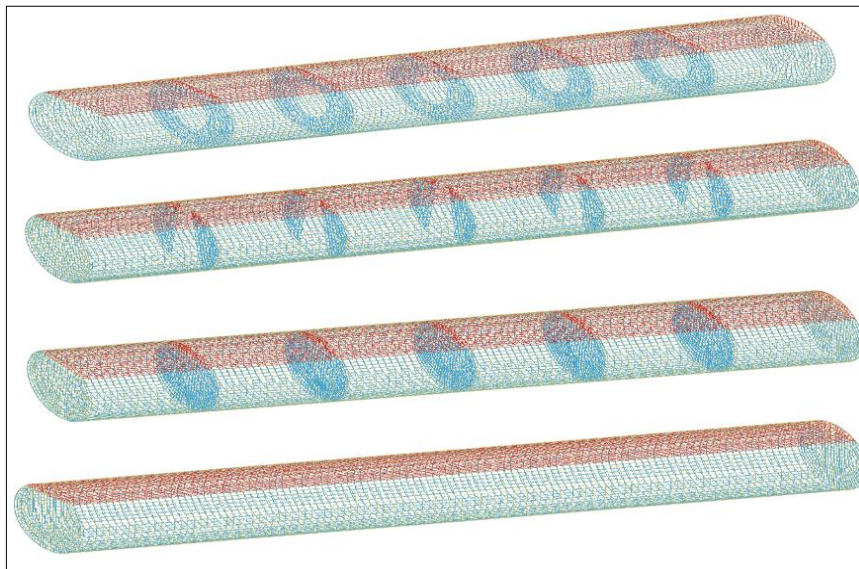


**Figura 4-2.** Cálculo del nivel del combustible en tanquero para 10000 galones.  
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

## 2.2.2. Condiciones de simulación

### 2.2.2.1. Malla de elementos finitos

Para la simulación se realizó cuatro modelos de malla que son los siguientes:

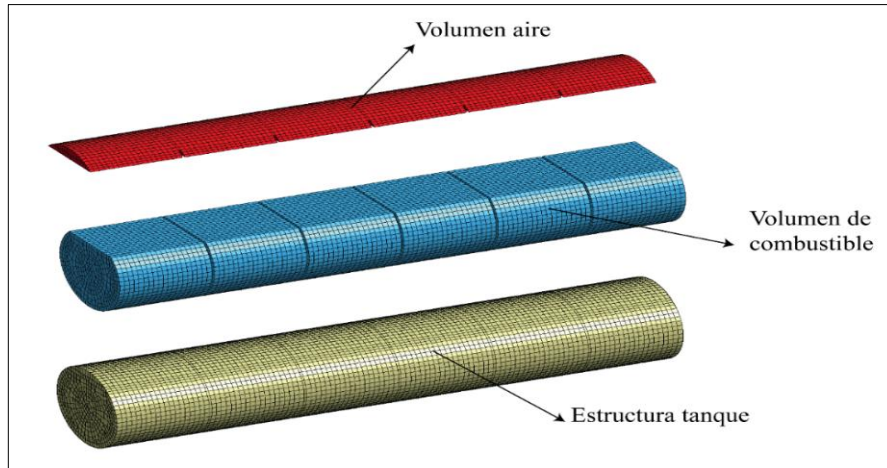


**Figura 5-2.** Modelos distribuidos en nodos para las diferentes simulaciones.  
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 6-2.** Información generada de los modelos establecidos.

Tipo de modelo	N° de elementos	Tipos de elementos	Índices de calidad		
			Aspect Ratio max	Angulo min	Angulo max
DA Espejos Circulares	53102	Solid ALE	36.13	21.58	146.32
DB Espejos triangulares	53703	Solid ALE	34.64	26.0	146.35
DC Espejos separados	57097	Solid ALE	34.68	23.07	146.35
DD Sin separaciones	57082	Solid ALE	34.68	29.32	146.36

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.



**Figura 6-2.** Descomposición de un tanque cisterna, representado en elementos.

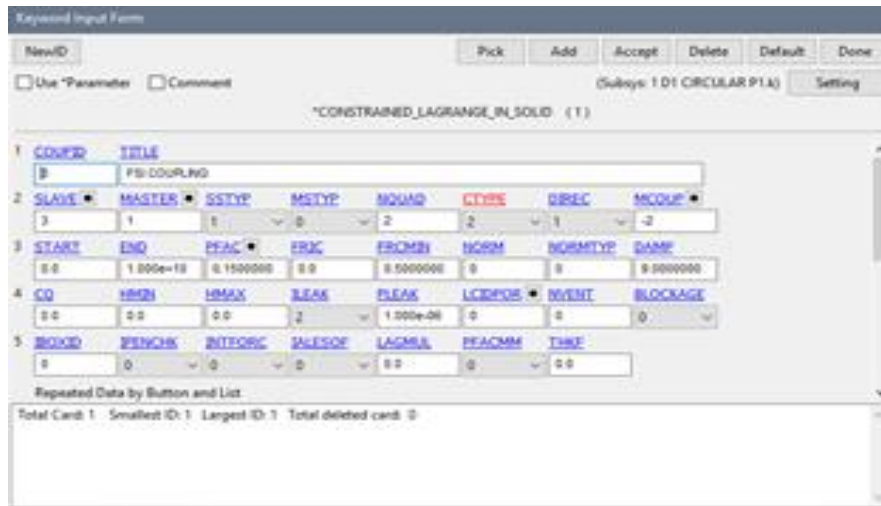
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

#### 2.2.2.2. Condiciones de simulación ALE

Para generar el método de interacción fluido-estructura se activan las siguientes cartas de control: La asignación de la carta de control \*ALE para generar la asignación de malla de tipo SOLID para el comportamiento interacción fluido de combustible y aire.

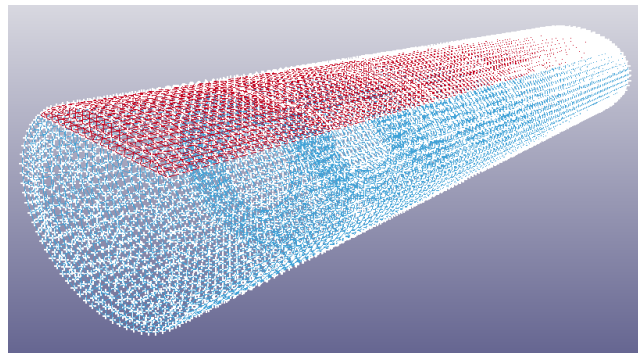
La carta de control \*CONSTRAINED LAGRANGE\_IN\_SOLID asigna el tipo de contacto que va tener la parte ALE de combustible y aire con la estructura del tanque, cabe destacar que importante evitar las fugas de fluido o llamada “*ileak*” en inglés, para lo cual se generan los parámetros mostrados en la figura 7-2.





**Figura 7-2.** Carta de control \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID  
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

Con “SPC” para el SET\_NODE aplicado a los nodos de la estructura se genera restricción de fluido. La estructura al ser un elemento de tipo langrangiano conlleva la característica principal de contener al elemento euleriano.



**Figura 8-2.** SPC en la estructura de la cisterna.  
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 2.2.2.3. Materiales

Para las simulaciones se utiliza tres tipos de materiales, material de tipo nulo para el combustible, material con propiedades de vacío para el aire y un material de tipo rígido para la estructura del tanque, las principales propiedades de los materiales se detallan a continuación:



**Tabla 7-2.** Características asignadas para cada material utilizado en las simulaciones.

Propiedad	Componente	Valor asignado	Tipo de material
Densidad	Combustible	680 kg/m <sup>3</sup>	MAT_NULL
Densidad	Aire	0 kg/m <sup>3</sup>	MAT_VACUUM
Densidad de masa	Estructura tanque	7800 kg/m <sup>3</sup>	MAT_RIGID
Módulo de elasticidad	Estructura tanque	2e <sup>11</sup> Pa	MAT_RIGID
Radio de Poisson	Estructura tanque	0.3	MAT_RIGID

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

#### 2.2.2.4. Ecuaciones de estado

Para el análisis ALE se activa la carta de control de ecuación de estado de tipo MURNAGHAN, El valor asignado para  $\gamma$  es 7 y  $k_0$  es 15000, estos valores son tomados del manual de Ls-dyna y ejercicios aplicando el método ALE.

The image shows a 'Keyword Input Form' window. At the top, there are buttons for 'NewID', 'RefBy', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use \*Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The main area contains the text '\*EOS\_MURNAGHAN\_(TITLE) (1)'. Underneath, there is a 'TITLE' field with the value 'Cobustible'. At the bottom, there is a table with columns 'EOSID', 'GAMMA', 'K0', and 'V0'. The values in the table are: EOSID: 20, GAMMA: 7.0000000, K0: 1.500e+05, and V0: 0.0.

**Figura 9-2.** Carta de control \*EOS\_MURNAGHAN

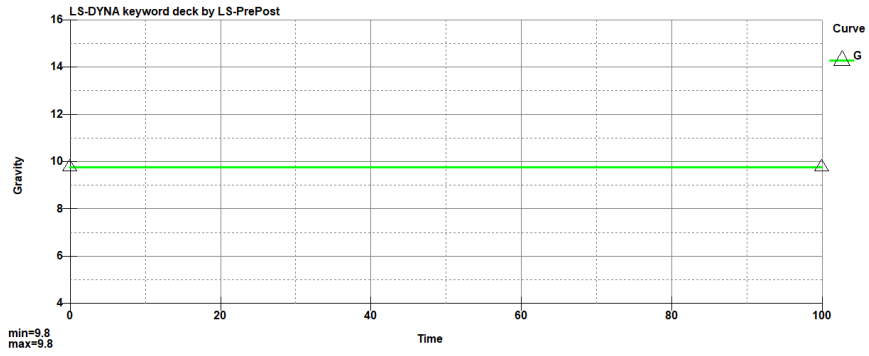
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

#### 2.2.2.5. Control de energía

Al aplicar un método explícito para la solución de la simulación ALE, es necesario controlar la energía de Hourglass para que los modelos sean estables. Se trabaja con IHQ=1.

#### 2.2.2.6. Cargas y aceleraciones en la simulación

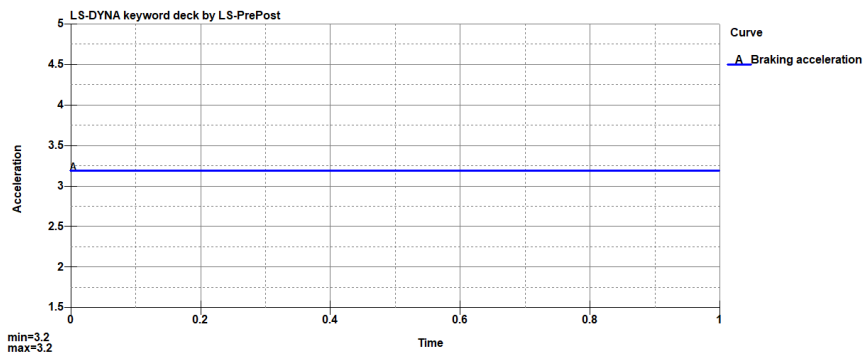
Para una buena simulación es preciso trabajar con parámetros que actúan al momento del traslado de combustibles, en este caso se utilizó la gravedad, aceleración de giro y frenado como parámetros básicos.



**Gráfico 1-2.** Parámetro de la gravedad.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

En base al cálculo de desaceleración de la tabla 4-2 se presenta la figura de la aceleración de frenado



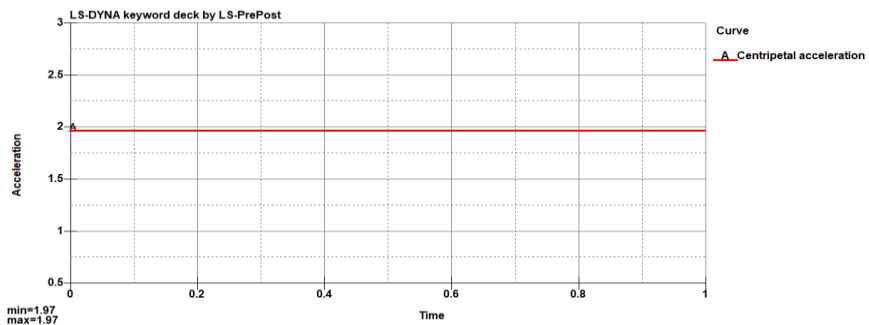
**Gráfico 2-2.** Parámetro de frenado

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Y mediante la ecuación para el cálculo de aceleración centrípeta se presenta la figura 15-2.

$$a_c = \frac{(22.2 \frac{m}{s})^2}{250 m}$$

$$a_c = 1.97 \frac{m}{s^2}$$



**Gráfico 3-2.** Parámetro de giro

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Las cargas son aplicadas por medio de aceleraciones con direcciones correspondientes, esto se aplica por medio de las cartas de control \*LOAD\_BODY\_X y Z en base a las curvas definidas.

LCID	SF	LCIDDR	XC	YC	ZC	CID
1	1.0000000	0	0.0	0.0	0.0	0

**Figura 10-2.** Carta de control \*LOAD\_BODY\_Z  
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 2.2.2.7. Control

El control de los elementos adicional de Hourglass se aplica el control ALE como se muestra en la figura 15-2, Termination con un tiempo de 20 s y Timestep con un periodo adecuado.

DCT	NADV	METH	AFAC	BFAC	CFAC	DFAC	EFAC
-1	0	2	-1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
START	END	AAFAC	VFACT	PRIT	EBC	PREF	NSIDEBC
0.0	1.000e+20	1.0000000	1.000e-06	0	0	0.0	0
NCPL	NBKT	IMASCL	CHECKR	BEAMIN	MMGPREF	PDJFMX	DTMUFAC
1	50	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
OPTIMPP	0						

**Figura 11-2.** Carta \* CONTROL ALE  
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Para la visualizacion de los elementos se plico \*DATA\_BASE para una presentacion con Binary3plot. Ademas de FSI.

### 2.2.3. Solución

Para la solución se utilizó el software LS DYNA de versión R8 single precisión y se realizó utilizando un computador de marca DELL, con un procesador Intel inside CORE i5, 4 Gb en RAM, sistema operativo de 64 bits.

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Resultados

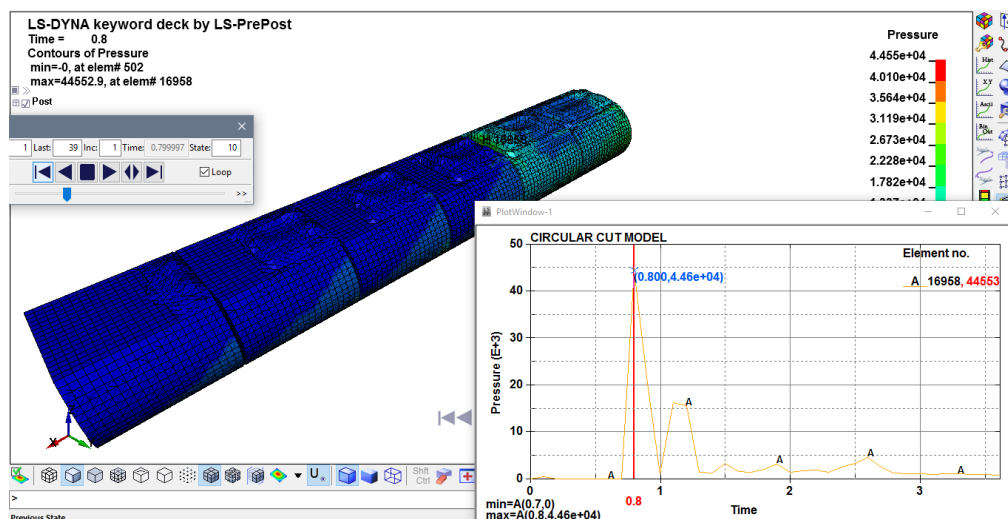
##### 3.1.1. Presión bajo aceleración de frenado

Para este análisis del líquido se va a seguir la dirección a la que se encontraba el contenedor, en este caso hacia delante, al frenar provoca un oleaje del líquido el cual al chocar con las paredes del contenedor éste regresara, el proceso se repetirá hasta que el líquido se estabilice.

##### 3.1.1.1. Modelo A (Redondo Hueco)

Para el modelo de espejo redondo hueco como se puede observar en el gráfico 1-3, durante el tiempo de simulación existe un punto en el cual se genera una presión elevada, que en este caso se genera en el elemento número 16958, este elemento se encuentra en la segunda cámara del tanque cisterna contado desde el cabezal.

Según la gráfica que se encuentra en la parte inferior derecha, refleja un pico de presión en el elemento mencionado anteriormente con un valor máximo de 44600 Pa en un tiempo de 0.8 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido.



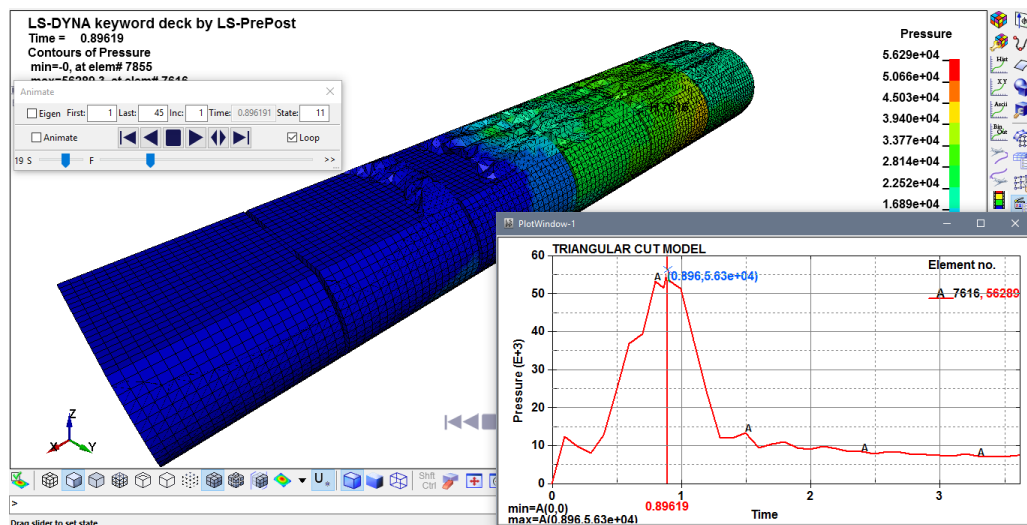
**Gráfico 1-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.1.2. Modelo B(Triangular)

Para el modelo de espejo triangular como se puede observar en el gráfico 2-3, durante el tiempo de simulación existe un punto en el cual se genera una presión elevada, que en este caso se genera en el elemento número 7616, este elemento se encuentra en la segunda cámara del tanque cisterna contada desde el cabezal.

Según la gráfica que se encuentra en la parte inferior derecha refleja un pico de presión en el elemento mencionado anteriormente con un valor máximo de 56300 Pa en un tiempo de 0.8962 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido.



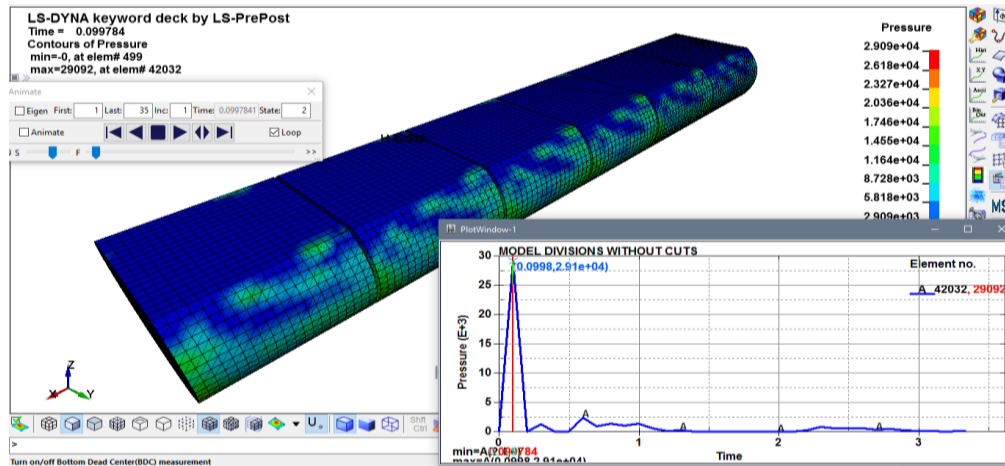
**Gráfico 2-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo B (Triangular).

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.1.3. Modelo C (Divisiones Separadas)

Para el modelo de espejo de divisiones separadas como se puede observar en el gráfico 3-3, durante el tiempo de simulación existe un punto en el cual se genera una presión elevada, que en este caso se genera en el elemento número 42032, este elemento se encuentra en la quinta cámara del tanque cisterna contado desde el cabezal.

Según la gráfica que se encuentra en la parte inferior derecha refleja un pico de presión en el elemento mencionado anteriormente con un valor máximo de 29100 pascuales en un tiempo de 0.0998 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido.



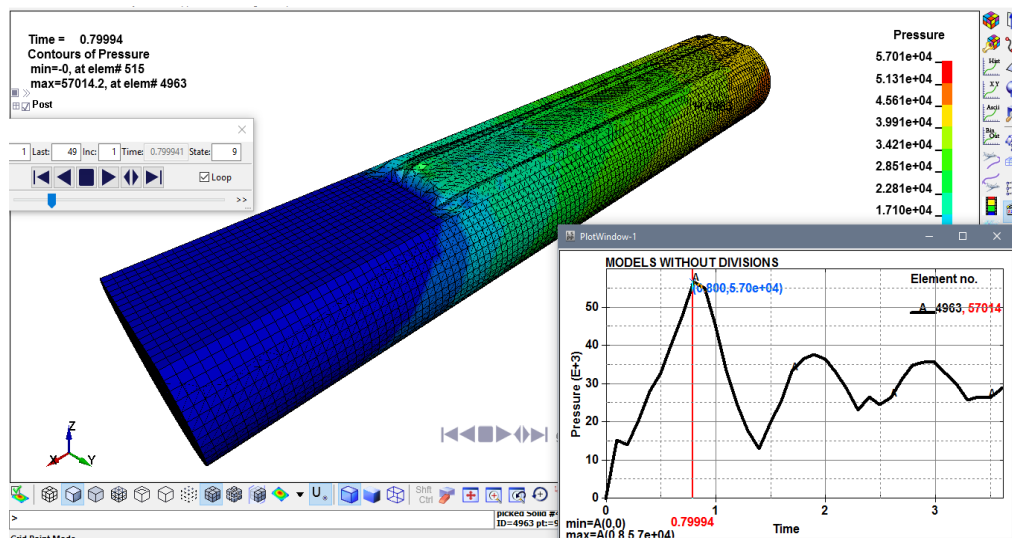
**Gráfico 3-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones separadas).

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.1.4. Modelo D (Sin divisiones)

Para el modelo sin divisiones, es decir solo el tanque como se puede observar en el gráfico 4-3, durante el tiempo de simulación existe un punto en el cual se genera una presión elevada, que en este caso se genera en el elemento número 4963, este elemento se encuentra en la parte delantera del tanque cisterna contado desde el cabezal.

Según la gráfica que se encuentra en la parte inferior derecha refleja un pico de presión en el elemento mencionado anteriormente con un valor máximo de 57014 pascasles en un tiempo de 0.8 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido.



**Gráfico 4-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones).

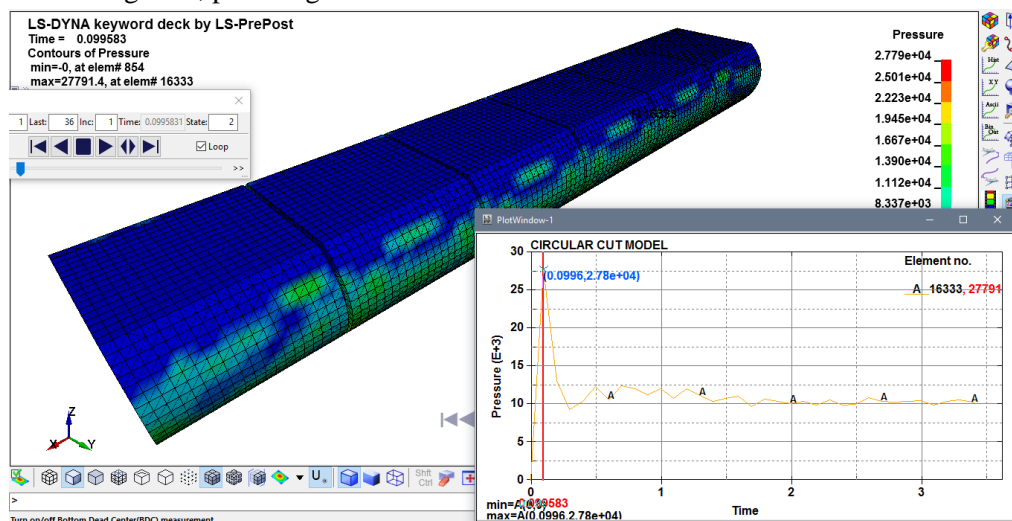
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.2. Presión bajo aceleración de giro

En este análisis se impone una aceleración de giro hacia la derecha, provocando que el líquido por la fuerza centrífuga siga el lado contrario del giro, al encontrarse en un contenedor por efecto de acción y reacción este retornara al inicio para después provocarse la misma acción varias veces hasta que el líquido se estabiliza.

#### 3.1.2.1. Modelo A (Redondo Hueco)

Para el modelo del gráfico 5-3 cabe describir que, durante su movimiento en este caso simulado, presento valores en un punto específico, en este caso en el elemento numero 16333 localizado en la tercera cámara contada desde el cabezal. Cuando se impuso la aceleración de giro, se produjo presiones la cual presento un pico máximo de presión de 27791 pascales en un tiempo de 0.0996 partes de un segundo, para luego estabilizarse.

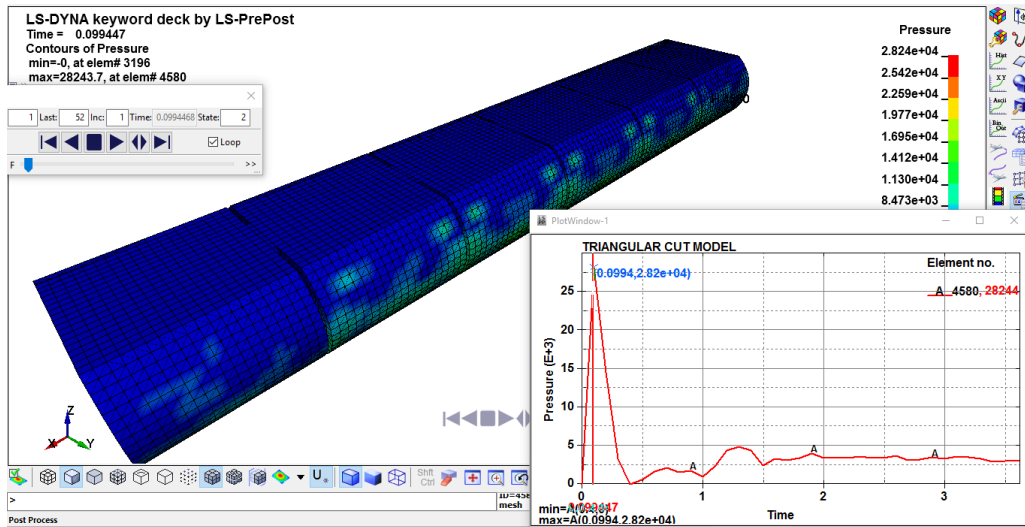


**Gráfico 5-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de giro.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

#### 3.1.2.2. Modelo B (Triangular)

Como muestra el gráfico 6-3 durante la simulación de giro en un momento dado y en un lugar en este caso en la cámara uno contada desde el cabezal y elemento número 4580 del mallado, se produce un pico máximo de presión. La onda de oleaje en este caso generó una presión máxima de 28244 Pa en un tiempo de 0.0994 partes de un segundo, tratando de terminar con una estabilización de líquido.

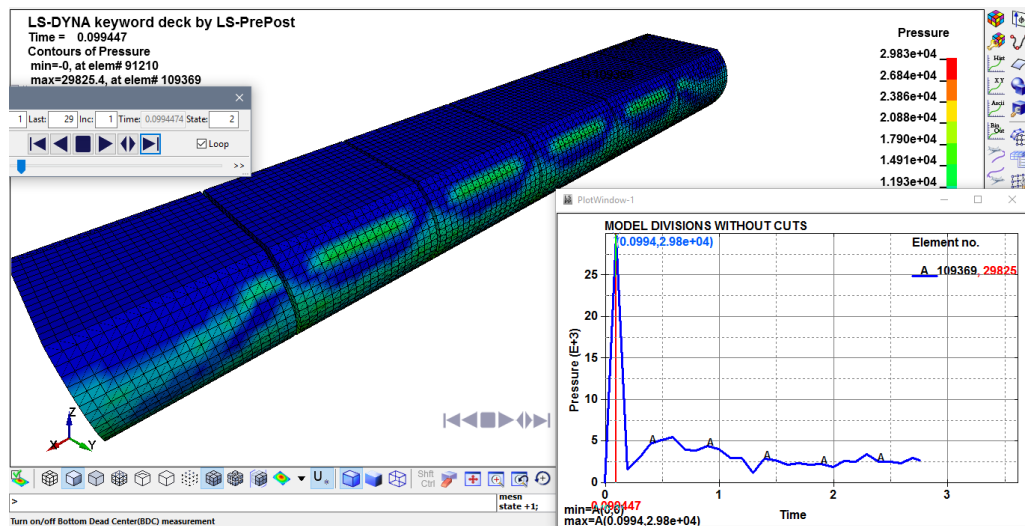


**Gráfico 6-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.2.3. Modelo C (Divisiones Separadas)

En un momento de la simulación, como se observa en el gráfico 7-3 existe valores máximos de presiones en un elemento, en este caso localizado en la segunda camada contada desde el cabeza. La grafica mostrada en la parte inferior derecha nos revela que la presión máxima es de 29825 Pa en un tiempo de 0.0994 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido.



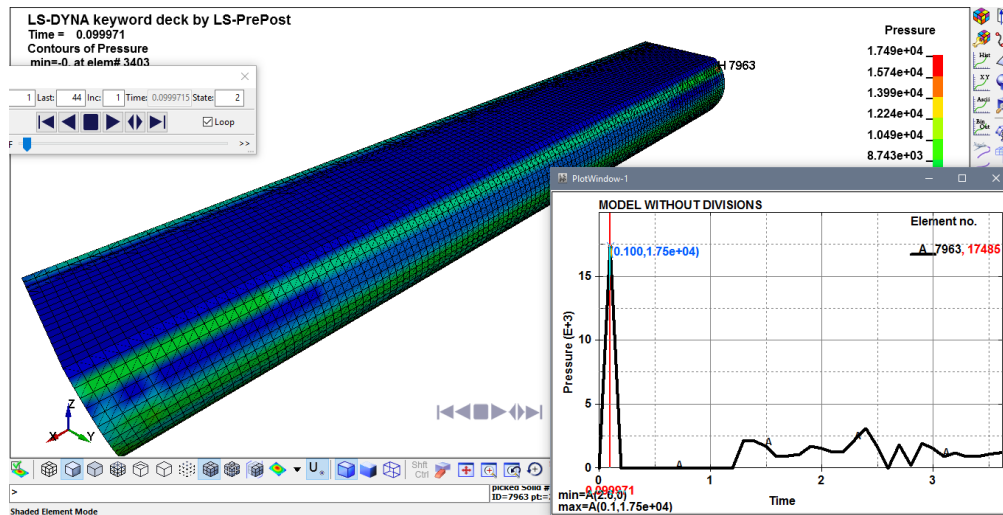
**Gráfico 7-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.



### 3.1.2.4. Modelo D (Sin Divisiones)

El gráfico 8-3, refleja la simulación de giro en la cual en un momento se genera valores de presión máximos en el elemento número 7963, localizado en la parte delantera del tanque. Mostrado en la parte inferior derecha el valor pico de presión máximo para esta simulación es de 17485 pascales en un tiempo de 0.1 partes de un segundo, seguido de una estabilización del líquido contenido.



**Gráfico 8-3.** Captura del momento que se produce la presión máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de giro.

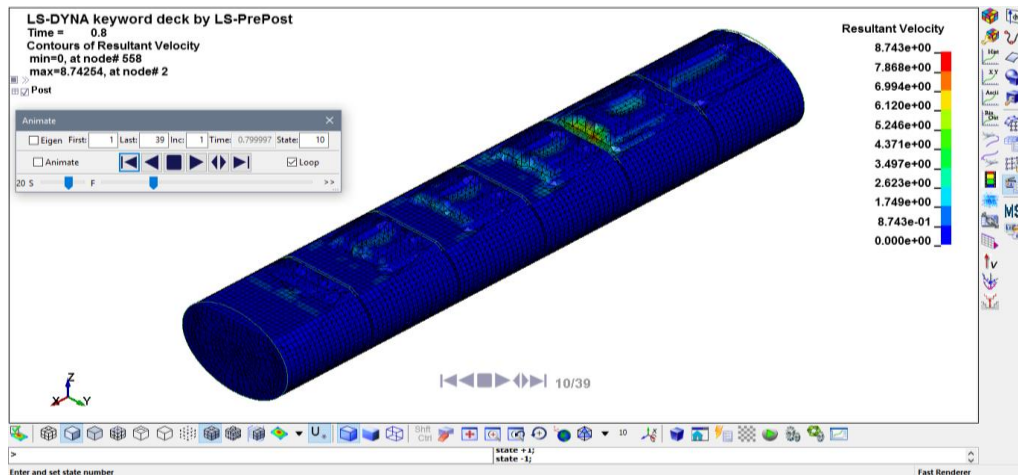
**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.3. Velocidad bajo aceleración de frenado

Durante esta simulación el contenedor se trasladaba a cierta velocidad uniforme, por tanto, el líquido no presentaba ninguna anomalía. En cierto tiempo se aplicó una aceleración de frenado el cual provoca que se presente el fenómeno de slushing en base a las velocidades para este caso de resultados. Los resultados de las velocidades para cada modelo serán simuladas y presentada a continuación.

#### 3.1.3.1. Modelo A (Redondo Hueco)

Como se observa en el gráfico 9-3, durante la simulación presenta movimiento del líquido, primero hacia delante, por el hecho de introducirse un frenado, es decir el líquido seguirá la dirección a la que se encontraba y después hacia tras por el hecho de que se encontró con el fin de las paredes del contenedor. Durante toda la simulación se generan velocidades, para este caso se presenta un valor máximo de velocidad de 8.743 m/s en un cierto tiempo de la simulación, para después ir atenuando las velocidades, es decir la estabilización del líquido.

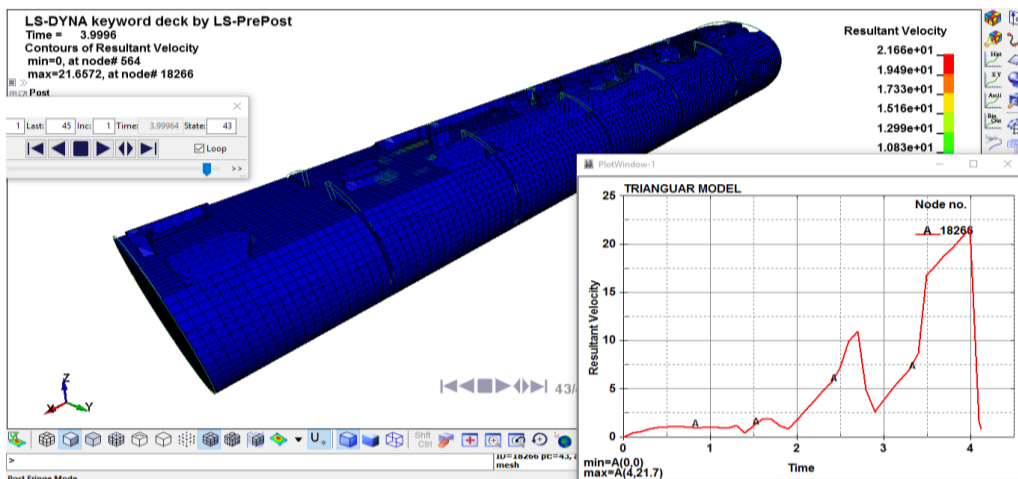


**Gráfico 9-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de frenado.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.3.2. Modelo B (Triangular)

Como se observa en el gráfico 10-3, durante la simulación presenta movimiento del líquido, primero hacia delante, por el hecho de introducirse un frenado, es decir el líquido seguirá la dirección a la que se encontraba y después hacia tras por el hecho de que se encontró con el fin de las paredes del contenedor. Durante toda la simulación se generan velocidades, para este caso se presenta un valor máximo de velocidad de 21.66 m/s en un tiempo de 4 s de la simulación, para después ir atenuando las velocidades, es decir la estabilización del líquido.

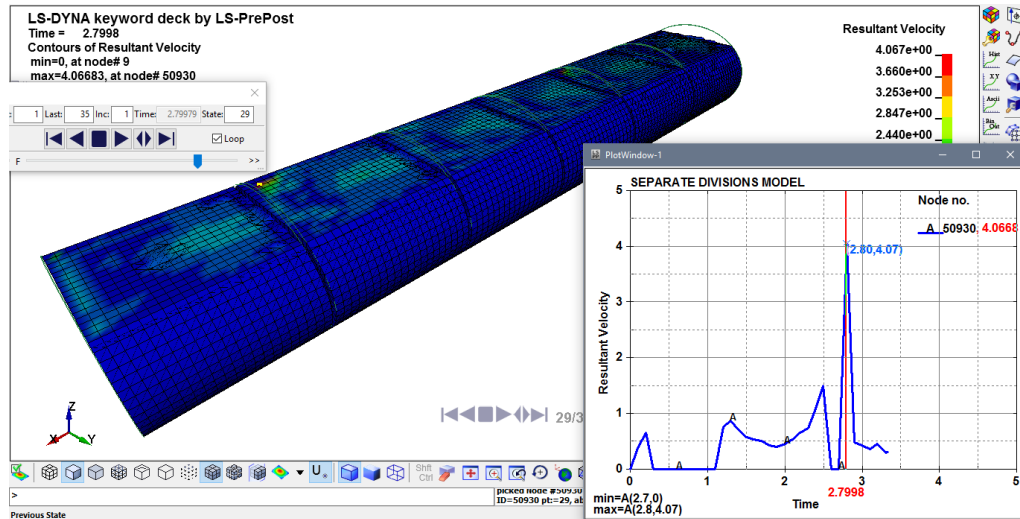


**Gráfico 10-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de frenado.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.3.3. Modelo C (Divisiones Separadas)

Como se observa en el gráfico 11-3, durante la simulación presenta movimiento del líquido, primero hacia delante, por el hecho de introducirse un frenado, es decir el líquido seguirá la dirección a la que se encontraba y después hacia tras por el hecho de que se encontró con el fin de las paredes del contenedor. Durante toda la simulación se generan velocidades, para este caso se presenta un valor máximo de velocidad de 4.067 m/s en un tiempo de 2.8 s de la simulación, para después ir atenuando las velocidades, es decir la estabilización del líquido.

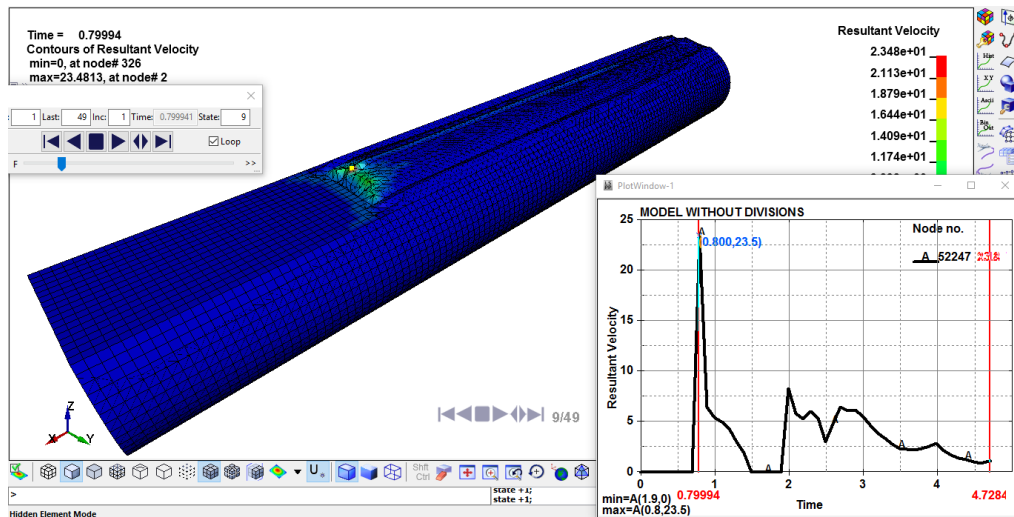


**Gráfico 11-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de frenado.

**Realizado por:** Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.3.4. Modelo D (Sin Divisiones)

Como se observa en el gráfico 12-3, durante la simulación presenta movimiento del líquido, primero hacia delante, por el hecho de introducirse un frenado, es decir el líquido seguirá la dirección a la que se encontraba y después hacia tras por el hecho de que se encontró con el fin de las paredes del contenedor. Durante toda la simulación se generan velocidades, para este caso se presenta un valor máximo de velocidad de 23.5 m/s en un tiempo de 0.8 s de la simulación, para después ir atenuando las velocidades, es decir la estabilización del líquido.



**Gráfico 12-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de frenado.

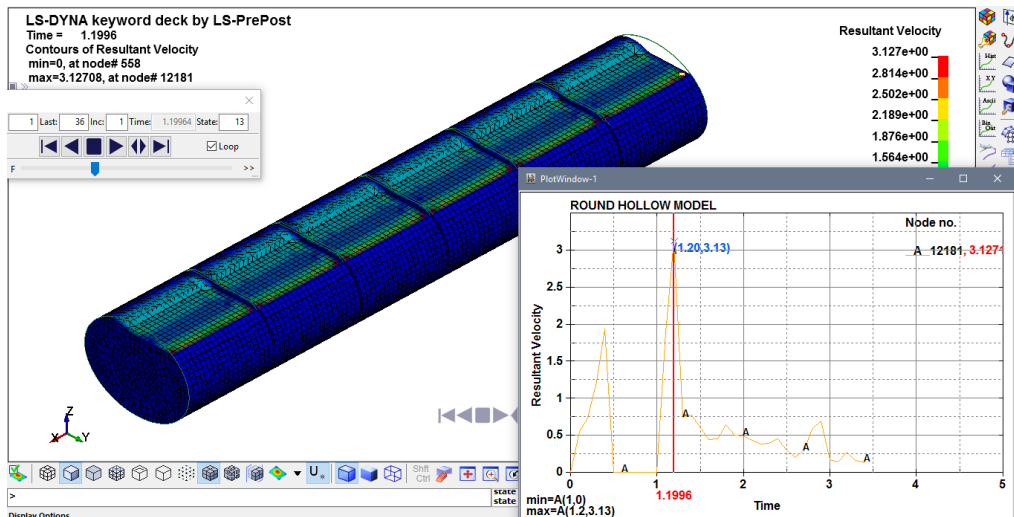
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.4. Velocidad bajo aceleración de giro

En este análisis se aplicó una aceleración de giro, la cual provocará que el líquido que está en equilibrio genere slushing, que en este caso será en base a velocidades. Los resultados serán acotados a continuación.

#### 3.1.4.1. Modelo A (Redondo Hueco)

La visualización de resultados del modelo A en la cual se muestra que líquido se guió hacia el lado contrario del giro, en este caso se giró hacia la derecha, por tanto, el líquido sigue un camino hacia la izquierda, para después retornar por acción del choque con las paredes del contenedor. El resultado de la velocidad se muestra en la parte inferior derecha del gráfico 13-3, donde se observa que la velocidad máxima de este modelo es de 3.13 m/s en un tiempo de 1.2 s de la simulación y a partir de este valor máximo el fluido empieza a estabilizarse ya que la velocidad se reduce al mínimo.

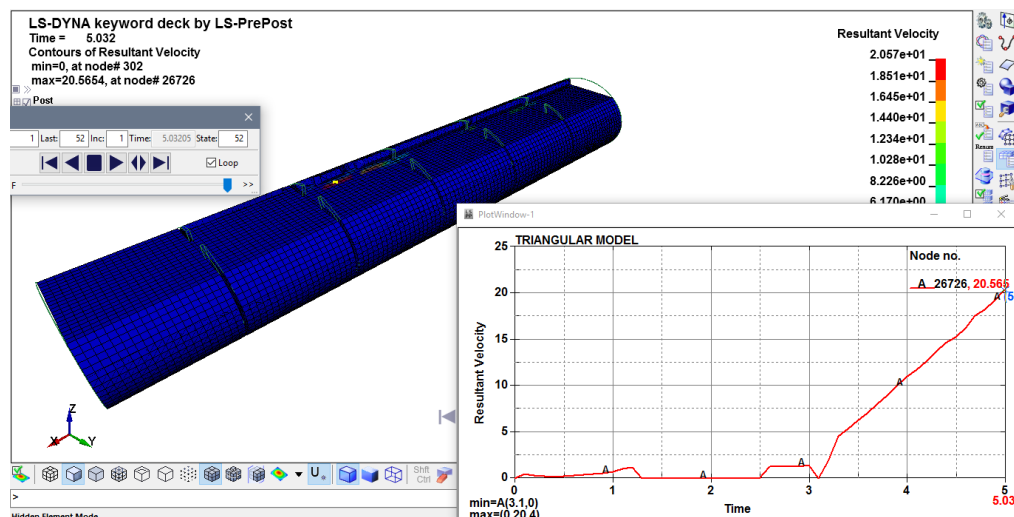


**Gráfico 13-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo A (Redondo Hueco) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.4.2. Modelo B (Triangular)

El resultado de la velocidad se muestra en la parte inferior derecha del gráfico 14-3, donde se observa que la velocidad máxima de este modelo es de 20.57 m/s en un tiempo de 5 s de la simulación.

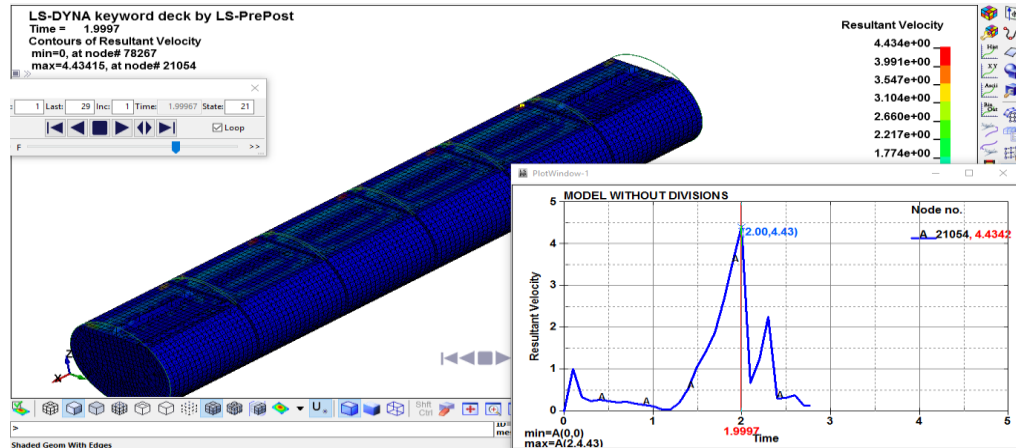


**Gráfico 14-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo B (Triangular) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.4.3. Modelo C (Divisiones Separadas)

El resultado de la velocidad se muestra en la parte inferior derecha del gráfico 15-3, donde se observa que la velocidad máxima de este modelo es de 4.43 m/s en un tiempo de 2 s de la simulación y a partir de este valor máximo el fluido empieza a estabilizarse ya que la velocidad se reduce al mínimo en menor tiempo que el modelo A.

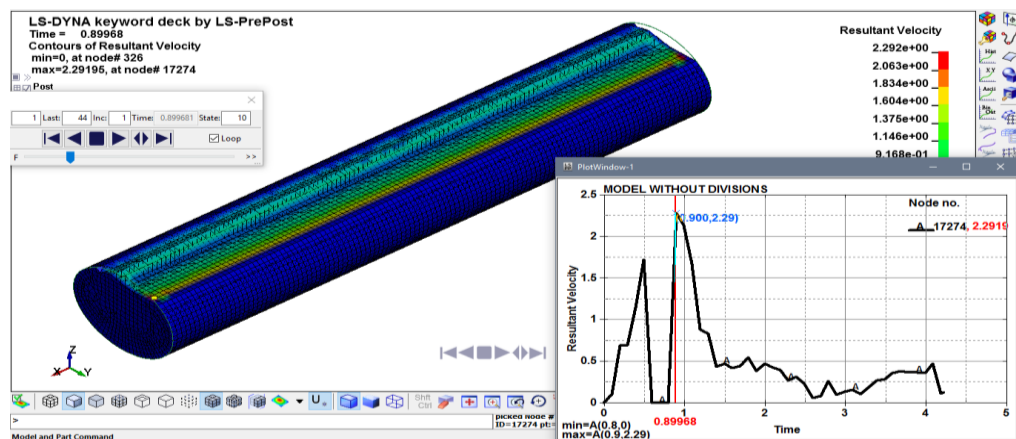


**Gráfico 15-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo C (Divisiones Separadas) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

### 3.1.4.4. Modelo D (Sin Divisiones)

El resultado de la velocidad se muestra en la parte inferior derecha del gráfico 16-3, donde se observa que la velocidad máxima de este modelo es de 2.29 m/s en un tiempo de 0.9 s de la simulación.



**Gráfico 16-3.** Captura del momento que se produce la velocidad máxima durante la simulación del modelo D (Sin Divisiones) con aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

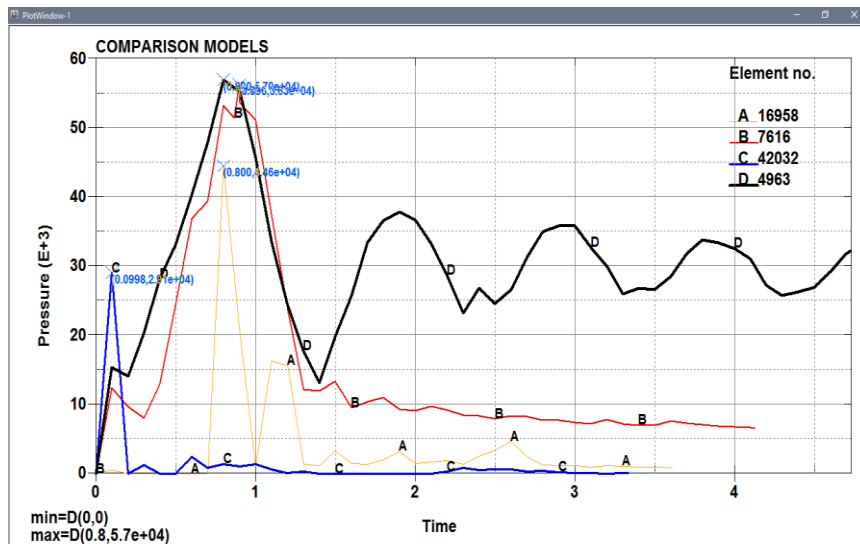


### 3.2. Discusión de resultados

Como se mostró en las simulaciones anteriores al tener un líquido en un recipiente e introducirle dinámica, nos resultara con fenómenos dentro del contenedor, en este caso en base a las presiones y velocidades. Las maniobras de conducción en el traslado de combustible son varios, en este caso se analizó aceleraciones de frenado y de giro en rangos límites, para así obtener valores máximos en todo momento.

Los resultados de cada simulación sirvieron para realizar una comparación entre ellos y poder llegar a la obtención de un modelo en específico que pueda disminuir los valores de presión y velocidad. El fenómeno de *Sloshing* es proporcional a valores de presiones y velocidades, es decir que, si se logra disminuir las presiones y velocidades del líquido en movimiento, también disminuirá este fenómeno. De cada simulación se obtuvo una gráfica de resultados que interpretándola se observó que tienen un pico máximo que fue el valor a tomar en cuenta para la comparación, además se observó que en un cierto tiempo de la simulación existe un descenso que estos valores a tal forma que se acerca al cero, es decir a la estabilización.

En este caso como muestra la tabla 1-3, en la comparación de valores máximos de presión podemos redactar que el modelo C (29100 Pa.) es el de menor valor, por lo tanto, para este caso fue este el modelo seleccionado. Además, se observó en la gráfica 17-3 que la estabilización de la presión es rápida y muy cercana al cero.



**Gráfico 17-3.** Grafica comparativa de presiones respecto a la aceleración de frenado.

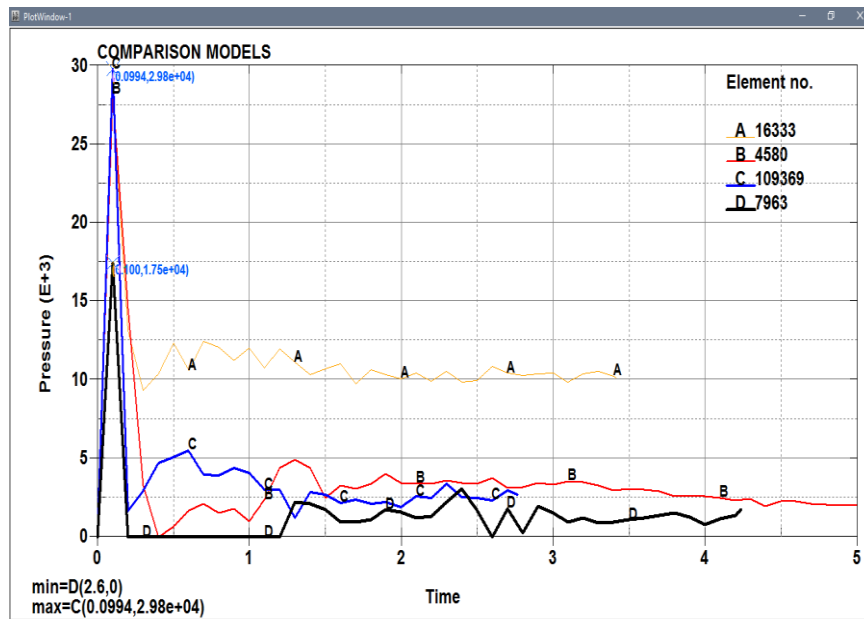
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 1-3.** Comparación de resultados de presión con aceleración de frenado.

Grafica de comparación	
Modelo	Valor max. (pa.)
A	44600
B	56300
C	29100
D	57014

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

La tabla 2-3, que existen picos máximos en el mismo tiempo de la simulación, pero un modelo destaca con el menor valor, en este caso el modelo D (17485 Pa.). Además, según la gráfica 18-3 el resultado de este modelo demuestra que la estabilización es más cercana al cero en comparación con los demás.



**Gráfico 18-3.** Grafica comparativa de presiones respecto a la aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 2-3.** Comparación de resultados de presión con aceleración de giro.

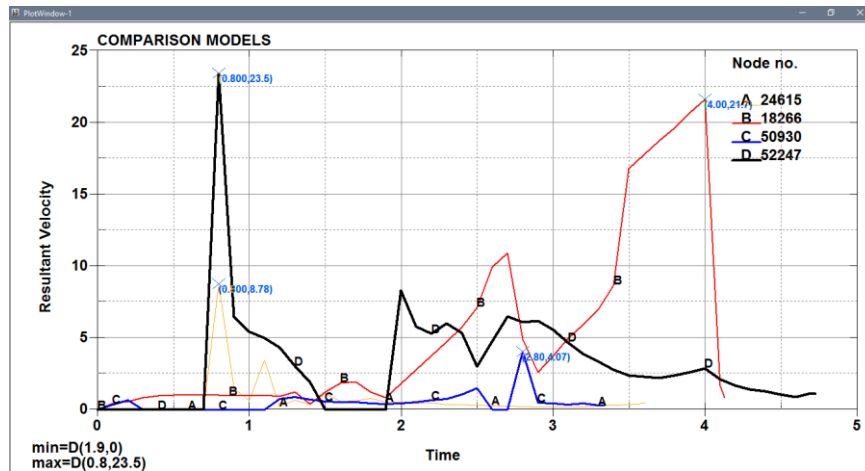
Grafica de comparación	
Modelo	Valor max. (Pa)
A	27791
B	28244
C	29825
D	17485

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Mostrado en la tabla 3-3, el modelo C proporcionó como resultado de velocidad de 4.067 m/s, siendo este el de menor valor en comparación a los demás, Además, este modelo obtiene como



resultado una cercanía más próxima al cero, es decir se estabiliza más rápido que los demás, como se observa en el gráfico grafica 19-3.



**Gráfico 19-3.** Grafica comparativa de velocidades respecto a la aceleración de frenado.

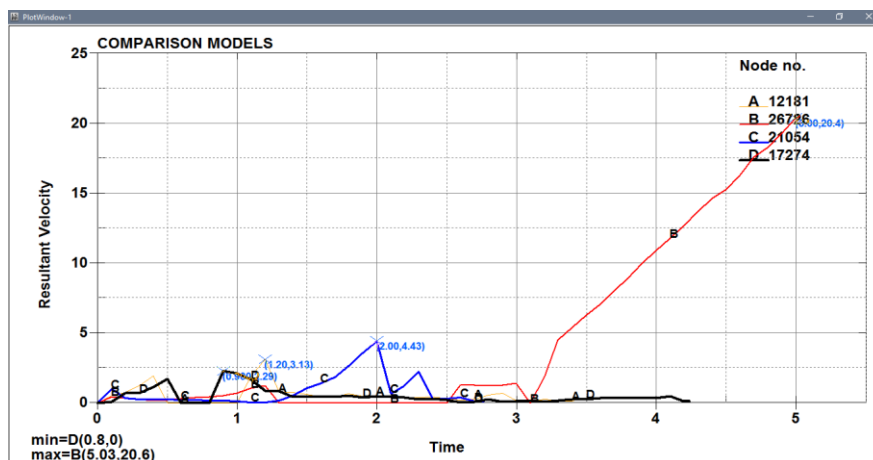
Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 3-3.** Comparación de resultados de velocidad con aceleración de frenado.

Grafica de comparación	
Modelo	Valor maxi. (m/s)
A	8.743
B	21.66
C	4.067
D	23.5

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Para este análisis de entre los valores comparados en la tabla 4-3, se denota que el menor valor de velocidad es del modelo D con un valor de 2.29 m/s. Además, se observa en el gráfico 20-3, que este modelo es el más cercano el cero tratándose de la estabilización.



**Gráfico 20-3.** Grafica comparativa de velocidades respecto a la aceleración de giro.

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

**Tabla 4-3.** Comparación de resultados de velocidad con aceleración de giro.

Grafica de comparación	
Modelo	Valor max. (m/s)
A	3.13
B	20.57
C	4.43
D	2.29

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Desde la comparación de las gráficas y valores resultantes de los modelos en análisis del fenómeno físico se presenta la tabla 5-3 que expresa los valores menores de entre los máximos alcanzados en cada modelo en su variable de análisis.

**Tabla 5-3.** Valores mínimos de comparación entre modelos y en bases a aceleración de frenado y de giro.

Variables	Modelo C	Modelo D
	Aceleración de frenado	Aceleración de giro
Presión	29100 Pa.	17485 Pa.
Velocidad	4.067 m/s	2.29 m/s

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021

Como podemos observar en la tabla 5-3, donde compara los valores de estos modelos los cuales fueron los que resultaron con menor valor en presión y velocidad. Claramente se evidencio que los modelos seleccionados cambian para la aceleración de frenado y la aceleración de giro. Para la aceleración de frenado el modelo idóneo y que menor valor demostró es el **C**, el cual consta de divisiones separadas sin orificios que comuniquen una cámara con otra. Es decir, este modelo contiene válvulas en cada cámara que permite el llenado de combustible. Mientras que, para la aceleración de giro, el modelo idóneo es el **D**, el cual mostró el menor valor en presión y velocidad. Este modelo es un tanque de una sola cámara el cual al llenar el combustible se unirá en el interior.

La idea es seleccionar dos modelos distintos, para lo cual en base a los valores obtenidos existe una disputa entre los modelos C y D, en base a una comparación como lo muestra la tabla 5-3.

**Tabla 6-3.** Valores resultantes de presión y velocidad con aceleración de frenado y aceleración de giro.

Modelo	Presión		Velocidad	
	Frenado	Giro	Frenado	Giro
A	44600 Pa.	27791 Pa.	27791 Pa.	3.13 m/s
B	56300 Pa.	28244 Pa.	28244 Pa.	20.57 m/s
C	29100 Pa.	29825 Pa.	29825 Pa.	4.43 m/s
D	57014 Pa.	17485 Pa.	17485 Pa.	2.29 m/s

Realizado por: Hernández Jonathan, 2021.

Para este trabajo es necesario poder seleccionar un modelo que contenga valores mínimos o semejantes tanto en presión como en velocidad, como muestra la tabla de comparación 6-3, en la cual al comparar los valores del modelo C se puede observar que los valores para aceleración de frenado y de giro no existe gran diferencia en las presiones y velocidades, es por esto que se seleccionó este modelo como el más idóneo en base a sus valores que relacionan con la geometría en la cisterna para este caso de estudio.

## CONCLUSIONES

Se recreó un fichero 3D con medidas que se asemejan a un tanque cisterna utilizado normalmente para el transporte de combustible en el país, mediante software CAD se dio el volumen máximo de llenado para lograr llegar a la capacidad máxima permitida, el cual se utilizó para los diferentes análisis.

Se analizó tres modelos de atenuadores del chapoteo u oleaje divididos en partes iguales a lo largo del tanque cisterna, adicionando un modelo común en las carreteras del país, el cual es un tanque de una sola cámara, es decir sin divisiones. Los modelos propuestos fueron en base a ideas que por física ayuden en la dinámica de fluidos. La cual está presente en el transporte de líquidos.

Se estableció condiciones dinámicas de frenado y de giro, que son las situaciones más repetidas en una conducción profesional. Para la simulación se utilizó una aceleración de frenado de  $3.2 \text{ m/s}^2$  y una aceleración de giro de  $1.97 \text{ m/s}^2$  obtenida en base a una velocidad máxima de 80 km/h y un radio de giro de 250 m según (NTE INEN 1323:2009).

En base a una comparación de resultados máximos de presiones y velocidades generadas al simular una aceleración de frenado, se determinó que el modelo C mostró una presión de 29100 Pa. y una velocidad de  $4.067 \text{ m/s}^2$ , siendo estos valores inferiores a los resultados de los restantes modelos. Mientras que, para la simulación de aceleración de giro, se determinó que el modelo D presento una presión de 17485 Pa. y una velocidad de  $2.29 \text{ m/s}^2$ , igualmente valores inferiores a los modelos restantes.

Se determinó que el sistema eficiente de entre los modelos analizados y seguro que disipe el sloshing de combustible al ser transportado es el modelo C compuesto por atenuadores sin cortes comprobado su comportamiento utilizando mecánica computacional durante el estudio en software CAE aplicando métodos computacionales de interacción fluido-estructural.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda estudiar el fenómeno de chapoteo en tanques de transporte de combustible a fondo para implementar regulaciones adecuadas.

Análisis de fluidos con metodología ALE mediante mecánica computacional

Aplicación de software para análisis de fluidos por su reducción de costos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**GUECAM.** *"Tanques de 1, 2 y 3 ejes"*. [Consulta: 01 de diciembre del 2020] Disponible en: <https://www.remolquesguerra.com/tanques-1-2-y-3-ejes>.

**BRUNO, L. et al.** *Espacial de combustible líquido*. "Diseño de dispositivos anti-sloshing para un vehículo ANALES AFA [En línea], 2012, (Argentina) 23 (3), pp. 47-52 [Consulta: 05 diciembre 2020]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66991>

**SOLIS, W.** *Acuerdo Ministerial N. 018, 2016*. Quito-Pichincha: Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 05 de Mayo de 2016.

**ANDRADE, F.** Control y Visualización de las Etapas de Recepción, Filtrado y Despacho de Combustible de la Planta Jet Fuel del Terminal el Beaterio de Petrocomercial (Trabajo de Titulación). (Ingeniería ) Escuela Politécnica Nacional. Quito, 2007.

**MAYORAL, J.** Simulación numérica de interacción fluido-estructura. (Tesis de pregrado). (Ingeniería) Universidad Carlos III de Madrid, Departamentode mecánica de medios continuos y teoria de estructuras, Madrid, España. 2012.

**ARREGUÍ DE LA CRUZ, F., et al.** *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Valencia-España: Universitat Politècnica de València, 2017.

**Enduraplas.** *How Important are Internal Baffles in Horizontal Leg Tanks?* [Consulta: 25 de noviembre 2020] Disponible en: <https://blog.enduraplas.com/liquid-storage-transport/how-important-are-internal-baffles-in-horizontal-leg-tanks>

**BRUNO, L.** Estudio del Fenómeno de Sloshing y diseño de dispositivos atenuadores para sistemas de almacenamiento de vehículos espaciales (Tesis de pregrado). (Ingeniería) Universidad Nacional de La Plata, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina. 2013.

**FREIRE, C.** La exploración y explotación de los hidrocarburos y su impacto ambiental en el marco de los derechos de la naturaleza establecidos en la Constitución del Ecuador del 2008 [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad central del Ecuador, Ecuador 2015. [Consulta: 2020-11-20]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/5356>

**EL COMERCIO.** *16 meses de cárcel para conductor responsable del accidente en que el falleció una mujer en la av. Simón Bolívar* [Consulta: 25 de noviembre 2020] Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/sentencia-accidente-simon-bolivar-quito.html>.

**EL TELÉGRAFO.** *Explosión de tanquero dejó un muerto y dos heridos* [Consulta: 25 de noviembre 2020] Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/judicial/12/explosion-tanquero-muerto-heridos>

**EL UNIVERSO.** *Segundo incendio de un tanquero en una semana* [Consulta: 25 noviembre 2020] Disponible en: <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/02/12/nota/7735440/segundo-incendio-tanquero-semana/>

**ENRÍQUEZ, A., & SALVADOR, F.** Diseño y construcción de un tanque para crudo de 13000 litros, con chasis [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador 2015. [Consulta: 2020-11-28]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8817>

**FAMBRO, D. et al.** *Determination of Stopping Sight Distances.* Washinton DC, Virginia-U.S.:U.S. Department of Commerce National Technical Information Service, 1997, pp. 20-27.

**GARZÓN, M. & SALAS, F.** Diseño de un tanque sobre chasis-cama alta acoplable a cabezales de transporte pesado para el traslado de combustibles líquidos [En línea] (Trabajo de Titulación). (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador: 2006. [Consulta: 2020-11-30]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/220>

**KOLAEI, A.; et al.** *“Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll”.* European Journal of Mechanics B/Fluids [En línea], 2014, (Canada) 46 (1), pp. 46-58 [Consulta: 02 diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.01.008>

**LA ANTIGUA DE FUENTESAÚCO.** *¿Conoces cómo es el transporte de la leche?* [Consulta: 10 de enero 2021] Disponible en: <https://queserialaantigua.com/blog/conoces-como-es-el-transporte-de-la-leche/>

**MALÓN H. et al.** Análisis del diseño y optimización de un contenedor cisterna frente al fenómeno de "Oleaje" [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería). Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España: 2017. [Consulta: 2020-12-01]. Disponible en: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/386>

**MARTÍN, A.** Estudio teórico experimental de la estabilidad lateral en vehículos cisterna. Metodología para la determinación del umbral de vuelco. [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctoral). Universidad politécnica de madrid, Madrid, España. 2017. [Consulta: 2020-12-05]. Disponible en: <https://oa.upm.es/16621/>

**MOVERTIS.** *Historia del transporte terrestre: descubre la evolución del sector.* [Consulta: 11 de noviembre 2020] Disponible en: <https://www.movertis.com/blog/historia-del-transporte-terrestre/>

**NORMA 3.1-IC.** *Trazado, de la Instrucción de Carreteras.* .Trazado, de la Instrucción de Carreteras. 2019.

**NTE INEN 1323:2009.** *Vehículos automotores.* Carrocerías de buses. Disponible en: <https://www.movertis.com/blog/historia-del-transporte-terrestre/>

**PÁEZ, M. & QUIÑONES, M.** Análisis del precio del petróleo y su impacto en las ventas de la compañía de servicios petroleros Imsuin Cía. Ltda. Ubicado en Quito, durante el año 2014-2016 [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Internacional SEK, Ecuador 2017. [Consulta: 2020-10-20]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2557>

**PAZ, H.** *Repensando la industria hidrocarburífera ecuatoriana.* [Consulta: 23 de noviembre 2020] Disponible en: <https://www.elcomercio.com/opinion/plan-petroleo-energia-opinion-columnista.html>

**TORRES, W. & GUERRA, S.** (12, 02, 2020) *Perdidas por combustible importados llegan a USD 1.233 millones en 2019.* Primicias. Recuperado de: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/combustibles-importados-usd-millones-2019/>



**GALLEGOS, C. et al.** "*Selección de materiales para rompeolas de auto tanques que transportan combustibles líquidos*". [Consulta: 22 de noviembre 2020] Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt285.pdf>

**BANCO CENTRAL DEL ECUADOR - REGULACIÓN, SUBGERENCIA DE PROGRAMACIÓN.** "*Reporte del sector petrolero iv Trimestre de 2019*". [Consulta: 23 de noviembre 2020] Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP201906.pdf>

**RES. 097- DIR-2016.** *Reglamento del procedimiento general de homologación vehicular y dispositivos de medición, control, seguridad y verificación de los vehículos comercializados*

**068-DIR-2017.** *Reforma a la Resolución “Res. 097-DIR-2016. Reglamento del procedimiento general de homologación vehicular y dispositivos de medición, control, seguridad y verificación de los vehículos comercializados”*

**ROMERO, J. et al.** *CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL OLEAJE EN TANQUES.*. Sanfandila-Mexico: Instituto Mexicano del Transporte, 2003.

**RUBIO, IGNACIO.** *Análisis de la dinámica de fluidos en un trailer cisterna utilizando CFD.* [Archivo de video]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=IndPxc7NIoI&ab\\_channel=IgnacioRubio](https://www.youtube.com/watch?v=IndPxc7NIoI&ab_channel=IgnacioRubio). (27 de Diciembre 2019).

**SCANSCOT.** *SIMULIA XFlow - Tank Sloshing Simulation.* [Archivo de video]. (21 de Agosto 2019) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=56cxOzgl-mc>

**S.N.** "*Used coated steel storage tank*". [Blog]. [Consulta: 01 de diciembre 2020] Disponible en: <https://www.vinimat.com/producto/cisterna-de-acero-pintado-usada/>.

**ZHANG, A. & SUZUKI, K.** "*A comparative study of numerical simulations for fluid–structure interaction of liquid-filled tank during ship collision*". *Ocean Engineering* [En línea], 2007, (China) 34 (1), pp. 645-652 [Consulta: 02 enero 2021]. Disponible en: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-ce5f912e-1809-32cd-9032-fc4b4bbe8fd3>

## ANEXOS

### ANEXO A: INTRODUCCIÓN Y TÍTULO I DEL ACUERDO MINISTERIAL N.º 18



**ACUERDO MINISTERIAL No. 018 - 2016**  
**ING. WALTER SOLIS VALAREZO**  
**MINISTRO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS**

#### CONSIDERANDO:

**Que** el numeral primero del artículo 154 de la Constitución de la República, dispone que a las ministras y ministros de Estado, les corresponda ejercer la rectoría de las políticas públicas del área a su cargo y expedir los acuerdos y resoluciones administrativas que requieran su gestión;

**Que** el artículo 14, de la Ley de Comercio, Electrónico, Firmas Electrónicas y Mensajes de Datos, publicada en el Registro Oficial Suplemento No. 557 de 17 de abril de 2002, reconoce la validez jurídica de la firma digital y le concede los mismos efectos jurídicos que a una firma manuscrita;

**Que** el literal m) del artículo 7, de la Ley de Caminos publicada mediante Decreto Supremo No. 1351, publicado en el Registro Oficial No. 285 de 7 de julio de 1964, señala que dentro de las atribuciones y deberes que corresponden al Director General de Obras Públicas está el determinar los pesos, tamaños y demás características de los vehículos que puedan transitar por los caminos carrozables de acuerdo a la clasificación y construcción;

**Que** mediante Acuerdo Ministerial No. 80 de 02 de julio de 1965, publicado en el Registro Oficial 567 de 19 de agosto del mismo año, se expide el Reglamento de Aplicación a la Ley de Caminos, reformado mediante Acuerdo Ministerial No. 93 de 09 de diciembre de 1969 y Decreto Ejecutivo No. 2044 de 23 de agosto de 1994, publicados en los registros oficiales 324 y 515 respectivamente, de 09 de diciembre de 1969 y 30 de agosto de 1994, en su orden.

**Que** mediante Decreto Ejecutivo No. 1137 de 19 de abril del 2012, se reforma los Capítulos IV y V del Reglamento Aplicativo de la Ley de Caminos, que regulan el Uso y Conservación de los Caminos Públicos, Pesos y Dimensiones, respectivamente;

**Que** la Disposición General Segunda del Decreto Ejecutivo No. 1137 de 19 de abril del 2012, indica que para el caso de las estaciones de control de pesos y dimensiones que serán administradas por Concesión o Delegación, el Ministerio Rector del Transporte, determinará la Normativa y los Procedimientos que deberán cumplirse para la operatividad en las mencionadas estaciones, además de las especificaciones técnicas y parámetros mínimos de diseños para la construcción de las mismas;

**Que** el Reglamento Aplicativo de la Ley de Caminos vigente, en el artículo primero señala que "Las unidades de carga, remolques y semiremolques que son importados, ensamblados o fabricados nacional e internacionalmente, que realizan operaciones de transporte de carga nacional o internacional; deberán someterse a las dimensiones y pesos máximos permitidos normados en la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones que será expedida por el Ministerio Rector del Transporte mediante el respectivo Acuerdo Ministerial y en las normas técnicas establecidas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización";



**Que** el mencionado Reglamento faculta al Ministerio Rector del Transporte, por ser el ente regulador del Sistema Nacional de Pesos y Dimensiones, determinar los procedimientos y normativa de control a través de un Manual Específico, y emitir las especificaciones técnicas y parámetros mínimos de diseño para la localización de las estaciones de control;

**Que** el Ministerio de Finanzas mediante Acuerdo Ministerial No. 055 de 07 de marzo de 2012, publicado en Registro Oficial No. 670, de 27 de marzo de 2012, establece que el ente rector de las finanzas públicas, es el único organismo que autoriza la emisión y fijación de precios de los pasaportes y demás especies valoradas;

**Que** el Ministerio de Transporte y Obras Públicas mediante Acuerdo Ministerial No. 036 de 18 de mayo de 2012, expide las Normas de Aplicación para el Control de Pesos y Dimensiones a nivel nacional, conforme las dimensiones y pesos máximos permitidos en la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones;

**Que** mediante Acuerdo Ministerial No. 076 de 14 de septiembre de 2012, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas expide los procedimientos para la recaudación de recursos económicos por autogestión del Ministerio de Transporte y Obras Públicas;

**Que** mediante Acuerdo Ministerial No. 086 de 23 de octubre de 2012, publicado en Registro Oficial No. 835 de 21 de noviembre de 2012, se aprueba la utilización del Sistema Informático Integrado de Transporte y Obras Públicas (SITOP);

**Que** mediante Acuerdo Ministerial No. 066 de 15 de julio de 2013, publicado en el Registro Oficial No. 125 de 15 de julio de 2013, se establecen los aranceles de autogestión institucional como tasas por los servicios prestados por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones;

**Que** mediante Acuerdo Ministerial No. 059 de 17 de julio de 2015, se reforma la Estructura y Estatuto Orgánico de Gestión Organizacional por Procesos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, el cual establece como una de las atribuciones de las Subsecretaría de Transporte Terrestre y Ferroviario y la Dirección de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial respectivamente aprobar la emisión de licencias de importación previo al embarque, Certificados de Operación Regular y Especial de vehículos de carga pesada;

**Que** el Estatuto Orgánico de Gestión Organizacional por Procesos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del 17 de julio de 2015, señala que la gestión de los productos y servicios de la Dirección Distrital de Transporte y Obras Públicas contempla la emisión de Certificados de Operación Regular y Especial de vehículos de carga pesada a nivel Distrital;

**Que** el Acuerdo Ibídem señala que cada organismo, entidad y dependencia del sector público, elaborará y mantendrá actualizado el registro de firmas manuales o digitalizadas de los solicitantes y delegados, para la exclusiva utilización de especies valoradas;

**Que** con Oficio No. STN-2003-1327 de 19 de marzo de 2003, el Ministerio de Economía y Finanzas emite informe favorable a fin de normar las tasas por servicio para Certificado de Operación Regular, Certificado de Operación Especial, Licencia para importación de vehículos y Timbres de Protección Vial.



Que mediante Memorando No. MTOP-DEV-2015-544-ME de 25 de junio de 2015, la Dirección de Estudios del Transporte del MTOP, señala que el peso bruto vehicular máximo permitido en las carreteras y puentes del país en condiciones normales es de 48 toneladas;

Que los vehículos de carga pesada que circulen por las carreteras de la Red Vial del País, cuyo peso bruto vehicular sea igual o superior a 3.5 toneladas, están sujetos al control por parte del Ministerio Rector del Transporte, dentro del ámbito de sus competencias;

Que es necesario establecer mecanismos para mejorar los niveles de servicio prestados por el Ministerio Rector del Transporte, en la emisión de los Certificados de Operación Regular y Especial, garantizando eficiencia, agilidad, modernidad y oportunidad de acceso para todos los usuarios;

En uso de las atribuciones que le confiere el artículo 154 de la Constitución de la República, el Reglamento Aplicativo a la Ley de Caminos y el Artículo 17 del Estatuto del Régimen Jurídico y Administrativo de la Función Ejecutiva.

#### ACUERDA:

Expedir las Normas de aplicación para el Control de Pesos y Dimensiones a los vehículos de carga pesada que circulan en la Red Vial del País.

#### TÍTULO I DE LOS PESOS Y DIMENSIONES

**ARTÍCULO 1.- Objeto:** Las presentes disposiciones son de carácter obligatorio para todas las personas naturales o jurídicas, públicas y privadas, generadoras de carga, propietarios y/o conductores de los vehículos de carga pesada y encargados del control del transporte terrestre, tránsito y seguridad vial, sus autoridades y afines. En todo lo demás, se estará en concordancia a lo dispuesto en los Capítulos IV y V del Reglamento Aplicativo de la Ley de Caminos vigente.

**ARTÍCULO 2.- Ámbito de Aplicación:** A todos los vehículos de carga pesada que son importados, ensamblados o de fabricación nacional, que realicen operaciones de transporte comercial o por cuenta propia, en la Red Vial del País, cuyo peso bruto vehicular (PBV) sea igual o superior a 3.5 toneladas.

#### CAPÍTULO I

##### TABLA NACIONAL DE PESOS Y DIMENSIONES

**ARTÍCULO 3.-** Conforme con lo establecido en el Reglamento Aplicativo de la Ley de Caminos en los Capítulos IV y V, en los cuales se regula el uso y conservación de los caminos públicos, pesos y dimensiones, los vehículos de carga pesada cuyo peso bruto vehicular sea igual o superior a 3.5 toneladas, de procedencia nacional o internacional, que realizan operaciones y/o movimientos de carga dentro del territorio nacional, deberán acogerse al peso y las dimensiones máximas permitidas, normados en el presente Acuerdo Ministerial.



ARTÍCULO 4.- Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones.

TABLA NACIONAL DE PESOS Y DIMENSIONES DE VEHÍCULOS DE CARGA PEQUEÑA MOTORES DIESEL, KILÓMETROS Y EQUIVARIANTES						
TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (PMP) (TON)	DIMENSIONES MÁXIMAS PERMITIDAS (MTR)		
				Long.	Ancho	Alto
2D			7	8,50	2,50	3,00
2DA			20	7,50	2,50	3,50
2DB			18	12,30	2,50	4,30
3-A			27	12,30	2,50	4,30
4-C			31	12,30	2,50	4,30
4-D			24	12,30	2,50	4,30
V200			16	12,30	2,50	4,30
V1A			27	12,30	2,50	4,30
T2			36	8,50	2,50	4,10
T3			27	8,50	2,50	4,10
R2			14	10,00	2,50	4,10
R3			21	10,00	2,50	4,30
S1			13	12,30	2,00	4,30
S2			20	12,30	2,50	4,30
S3			24	12,30	2,00	4,30
M1			7	10,00	2,50	4,10
M2			16	10,00	2,50	4,10
M3			21	10,00	2,50	4,30

1



TABLA NACIONAL DE PESO BRUTO VEHICULAR Y DIMENSIONES MÁXIMAS PERMISIDAS EN COMBINACIONES

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO BRUTO MÁXIMO ADMISITO (VEHICULO CONVENCIONAL)	COMBINACIONES		
				4x2	4x4	4x3
251			20	20,50	2,00	4,30
252			30	20,50	2,00	4,30
253			40	20,50	2,00	4,30
254			30	20,50	2,00	4,30
252			47	20,50	2,00	4,30
*253			48	20,50	2,00	4,30
282			32	20,50	2,00	4,30
**243			30	20,50	2,00	4,30
*283			48	20,50	2,00	4,30
**282			41	20,50	2,00	4,30
284			25	20,50	2,00	4,30
282			32	20,50	2,00	4,30
283			33	20,50	2,00	4,30
284			34	20,50	2,00	4,30
282			41	20,50	2,00	4,30
283			48	20,50	2,00	4,30

Sin perjuicio de lo establecido en la presente tabla, en los procesos de control se podrá autorizar la circulación de los vehículos de carga pesada con las siguientes consideraciones:

\* 253 y 283: +3 toneladas

\*\* 282 y 283: +1 tonelada



**ARTÍCULO 5.- Definiciones:**

1. **Distribución máxima de carga por eje.-** Describe el peso máximo por eje simple o conjunto de ejes, permitido a los vehículos para su circulación por la Red Vial del País.
2. **Descripción.-** Configuración de los vehículos de carga de acuerdo al número de sus ejes.
3. **Firma Digital.-** Imagen impresa de firmas autorizadas, incorporadas en los Certificados de Operación mediante el SITOP, con su respectiva seguridad y procedimiento de validación.
4. **Guía de remisión.-** Es el documento que sustenta el traslado de mercaderías por cualquier motivo dentro del territorio nacional.
5. **Longitudes máximas permitidas.-** Dimensiones de largo, ancho y alto permitidas a los vehículos para su circulación por la Red Vial del País.
6. **Peso bruto vehicular.-** Peso del vehículo vacío (tara, trípulante, combustible) más el peso de la carga transportada.
7. **Red Vial del País.-** Carreteras y caminos de titularidad pública.
8. **SITOP.-** Sistema Integrado de Transporte y Obras Públicas.
9. **Tanquero.-** Vehículo destinado exclusivamente para el transporte de fluidos.
10. **Tasa de Uso de Vía.-** Valor asignado por los servicios prestados por el Ministerio Rector del Transporte.
11. **Tipo.-** Es la descripción de la nomenclatura por vehículo.
12. **Vehículo de carga pesada.-** Vehículo cuyo peso bruto vehicular sea igual o superior a 3.5 toneladas, de procedencia nacional o internacional.

**ARTÍCULO 6.-** Para efectos de aplicación de la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones, contenida en el Artículo 3 del presente Acuerdo, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) **Distribución de carga:** La carga regular no debe sobresalir del vehículo en el que se moviliza, sin su respectiva autorización, señalización y seguridades, y deberá estar distribuida conforme a la capacidad de carga por eje establecida en la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones.

No obstante, si las condiciones de seguridad lo permiten, la carga indivisible podrá sobresalir un máximo de dos metros de la parte posterior del vehículo y/o un margen máximo de 10 centímetros de altura de los límites establecidos en la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones; siempre que esté debidamente señalizada y la longitud total no supere el máximo combinado.



- b) **Sujeción de la carga:** La carga regular o especial deberá estar correctamente asegurada a la estructura del vehículo que la contiene, a fin de evitar su movimiento durante el transporte.
- c) **Vehículos, Remolques y Semirremolques de operación nacional:** Los propietarios de unidades o combinaciones con configuraciones de tipo diferentes a las normadas en la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones, que realizan transporte habitual de mercancías específicas dentro del territorio nacional, podrán obtener el Certificado de Operación Regular, conforme a las condiciones establecidas por la Subsecretaría de Transporte Terrestre y Ferroviario; para cada caso se deberá presentar el proyecto de movilización de carga que contenga la siguiente información:
- a) Análisis técnico de movilización de carga;
  - b) Especificación completa de la carga y/o equipo a transportarse;
  - c) Especificación técnica del vehículo o vehículos que movilicen la carga;
  - d) Esquema de distribución de la carga en el vehículo; y,
  - e) Ruta y frecuencia específica.

La Subsecretaría de Transporte Terrestre y Ferroviario emitirá, de ser el caso, el informe técnico que defina la aprobación o negación, vigencia y tasas.

- d) **Transporte de combustible:** Los volúmenes máximos permitidos para realizar transporte de combustibles básicos en estado líquido (gasolina, diesel, jet oil o similares) en tanqueros, se detallan a continuación:

Capacidad máxima para transporte de combustible	
Tipo de Vehículo	Galones Permitidos
2DB	4.000
3 A	6.000
3S2	8.000
3S3	10.000

Además de los requisitos previstos en el Capítulo IV del Reglamento Aplicativo a la Ley de Caminos y en el presente Acuerdo, para la obtención del Certificado de Operación Regular, se deberá presentar el documento emitido por la autoridad competente que habilita el transporte de combustible.

