

ISSN 0188-7297



**Certificado en ISO 9001:2000**  
**Laboratorios acreditados por EMA**

SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

---

# **SELECCIÓN DE MATERIALES PARA ROMPEOLAS DE AUTOTANQUES QUE TRANSPORTAN COMBUSTIBLES LÍQUIDOS**

Carlos Adrián Favela Gallegos  
Manuel de Jesús Fabela Gallegos  
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No 285**  
**Sanfandila, Qro 2006**

---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Selección de materiales para  
rompeolas de autotanques que  
transportan combustibles líquidos**

**Publicación Técnica No. 285  
Sanfandila, Qro. 2006**

---

## **Créditos y agradecimientos**

---

Este documento fue elaborado por el M. C. Carlos Adrián Favela Gallegos, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos y el Dr. Miguel Martínez Madrid, asistente, investigador y coordinador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Participaron también en actividades para su desarrollo los M. C. Andrés Ramírez Valencia, Ricardo Hernández Jiménez, David Vázquez Vega, Javier Hernández Pérez y Oscar Flores Centeno.

Para su elaboración se tomó como base el documento “Selección de materiales para rompeolas de autotanques que transportan combustibles líquidos”, presentado como Tesis de Maestría en febrero del 2007 por el Ing. Carlos Adrián Favela Gallegos, dentro del Programa de Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. A su vez, esta investigación forma parte del estudio EI 19/04 “Desarrollo de geometrías y materiales alternativos de rompeolas en autotanques para el transporte de combustibles líquidos”, llevado a cabo en el Instituto Mexicano del Transporte.

---

# Índice

---

	Página
<b>Resumen</b> .....	V
<b>Abstract</b> .....	VII
<b>Resumen ejecutivo</b> .....	IX
<b>Introducción</b> .....	1
<b>1 Antecedentes</b> .....	5
1.1 Aspectos generales del oleaje de líquidos .....	5
1.1.1 Estudio del movimiento de fluidos en contenedores .....	5
1.1.2 Comportamiento de vehículos pesados .....	7
1.1.3 Efecto de la carga líquida en la estabilidad.....	7
1.1.4 Transporte de combustibles líquidos por carretera .....	8
1.1.5 Medidas para la supresión del oleaje.....	10
1.1.6 Rompeolas transversales en autotankes .....	12
1.1.7 Incremento de la estabilidad de vehículos pesados.....	14
1.2 Transporte de combustibles por carretera .....	14
1.2.1 Niveles de seguridad de autotankes .....	14
1.2.2 Configuración actual del tonel.....	15
1.2.3 Material de tonel y rompeolas .....	16
1.2.4 Selección de materiales .....	17
1.3 Objetivo .....	18
1.4 Alcances del estudio .....	20
<b>2 Consideraciones para el análisis de rompeolas</b> .....	21
2.1 Esquema conceptual.....	21
2.2 Generalidades del escalamiento de fenómenos .....	22
2.2.1 Ventajas y desventajas de los modelos a escala.....	23
2.2.2 Análisis dimensional .....	23
2.2.3 Homogeneidad dimensional.....	24
2.2.4 Comentarios generales acerca del análisis dimensional .....	24
2.2.5 El teorema de Buckingham .....	25
2.2.6 Características de los modelos a escala.....	26

---

	Página
2.2.7 Similitud completa .....	27
<b>3 Prototipo de tonel y experimentación</b> .....	<b>29</b>
3.1 Consideraciones generales del dispositivo de prueba .....	29
3.2 Análisis dimensional.....	32
3.3 Pruebas de oleaje con un contenedor a escala .....	33
3.4 Diseño experimental .....	34
3.5 Geometrías alternativas para rompeolas .....	34
3.6 Geometrías de prueba .....	35
3.7 Equipo utilizado y descripción de las pruebas.....	36
3.8 Adquisición de datos .....	37
3.9 Resultados de las pruebas de oleaje .....	38
3.10 Análisis de resultados .....	40
3.11 Conclusiones sobre la geometría.....	44
<b>4 Selección de materiales</b> .....	<b>47</b>
4.1 Aspectos generales.....	47
4.1.1 Tipos y propiedades de clases comunes de materiales.....	48
4.1.2 Las cartas de propiedades de los materiales.....	50
4.1.3 Exhibición de las propiedades .....	50
4.1.4 Índices de desempeño .....	51
4.1.5 Derivación de los índices de desempeño .....	52
4.2 Selección de materiales para rompeolas alternativos .....	53
4.2.1 Identificación de las propiedades críticas .....	53
4.2.2 Derivación del índice de desempeño .....	55
4.2.3 Materiales alternos.....	60
<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>65</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>69</b>

# Resumen

---

El oleaje que se presenta en autotankers a niveles parciales de llenado, es un factor que afecta la estabilidad del vehículo durante su tránsito por carretera. Para atenuar el oleaje en la dirección longitudinal, en el transporte de combustibles líquidos se utilizan barreras transversales llamadas rompeolas. Estos rompeolas, tradicionalmente fabricados de acero de bajo carbono, son de forma elíptica, ajustándose a la forma de la sección transversal del tonel. La masa y distribución de dichos elementos incrementa el peso del autotanker y la altura de su centro de gravedad, afectando negativamente la estabilidad del vehículo.

En este trabajo se presentan resultados experimentales de la fuerza de oleaje en un tonel a escala reducida para probar la efectividad de los rompeolas y su número dentro del tonel. Estos resultados conducen al cuestionamiento del material utilizado en su construcción. En el contexto, se introducen geometrías de rompeolas con mayor efectividad en la atenuación del oleaje longitudinal, así como un material no metálico en sustitución del acero para la fabricación de rompeolas. Se resaltan las características de resistencia del material alternativo, así como su compatibilidad con los combustibles líquidos como diesel y gasolinas. Consecuentemente, el uso de este material promueve mejoras en parámetros de influencia sobre la estabilidad, disminuyendo sensiblemente la masa del tonel y su correspondiente altura del centro de gravedad. El estudio, además, sugiere la implementación de investigaciones de mayor profundidad relacionados con aspectos de escalamiento y similitud.



# Abstract

---

Sloshing is an important factor that affects tanker trucks stability at partial fill levels. To attenuate longitudinal sloshing in tankers during liquid fuel transportation, transversal baffles are used inside the tank. These baffles are commonly constructed of low carbon steel plates, and in an elliptical shape according transversal tank section. Baffles mass increases global tanker mass, raising significantly the vehicle's center gravity height, and affecting in this way vehicle's stability.

This work was conducted to test baffles effectiveness in longitudinal sloshing attenuation using a reduced scale tank. Experimental results of sloshing force lead to question actual baffles' material and shape, and to introduce alternative geometries and no-metallic material instead traditional steel. Resistance characteristics of alternative material are remarked, as well as compatibility with liquid fuels like diesel and gasoline. Consequently, the use of this material promotes improvements in parameters that affect vehicle's stability, reducing tank mass and its center mass height. The study also suggests the implementation of major detail research about scaling and similarity aspects.



## Resumen ejecutivo

---

Los autotancques son vehículos especializados para el transporte de carga fluida. Ciertos tipos de materiales líquidos requieren ser transportados a niveles de llenado parcial. Tal es el caso de los combustibles líquidos, que requieren de un espacio libre que absorba los cambios térmicos producto de las variaciones de temperatura durante el transporte. La condición de llenado parcial favorece la generación de oleaje del líquido sobre la superficie libre, debido a los cambios de velocidad y dirección del autotanque. Para atenuar el oleaje en la dirección longitudinal se emplean rompeolas, placas colocadas transversalmente a lo largo del tanque que se ajustan a su sección transversal. El material de los rompeolas es comúnmente acero de bajo carbono, cuya masa contribuye de manera significativa a la masa total del vehículo y en la ubicación de su centro de gravedad. A mayor altura, mayor propensión a la volcadura y efecto negativo en la estabilidad global.

Existe poca o nula información relacionada con la efectividad de los rompeolas en autotancques. De manera tradicional, los autotancques de 20 m<sup>3</sup> de capacidad empleados para el transporte de diesel y gasolinas, utilizan 5 rompeolas uniformemente distribuidos a lo largo del tonel, el cual es de sección transversal elíptica. Estos autotancques se llenan a un 94% de su capacidad; sin embargo, se desconoce el nivel de la fuerza generada por el oleaje longitudinal y la participación de los rompeolas en su generación o atenuación. Así mismo, se cuestiona la funcionalidad del material de los rompeolas, cuya masa representa alrededor del 10% de la masa del tonel.

Con el propósito de obtener información referente al efecto del número de rompeolas en el oleaje longitudinal, se desarrolló un estudio empleando un tonel a escala, tomando como base la capacidad y las dimensiones de un tonel típico de 20 m<sup>3</sup>. Las pruebas en laboratorio y los resultados sobre mediciones de la fuerza de oleaje, permitieron sugerir nuevas geometrías de rompeolas que pudieran sustituir la geometría actual. Además, dieron lugar a la propuesta de un material alternativo no metálico, cuyo uso y desempeño igualara el del acero utilizado, tanto en términos de resistencia como de compatibilidad con los combustibles transportados.

En el contexto de la estabilidad del vehículo, las geometrías y los materiales alternativos promueven mejoras en los parámetros de influencia. Su uso sugiere mayor efectividad en la atenuación del oleaje longitudinal, incluidos los menores niveles de llenado. Además, la menor densidad del material permite disminuir sensiblemente la masa del tonel y, con ello, la correspondiente altura del centro de gravedad del autotanque. Adicionalmente, el tratamiento del estudio sugiere la implementación de investigaciones de mayor profundidad, relacionados con aspectos de escalamiento y similitud, que conlleven a un mejor aprovechamiento de los modelos a escala.



# Introducción

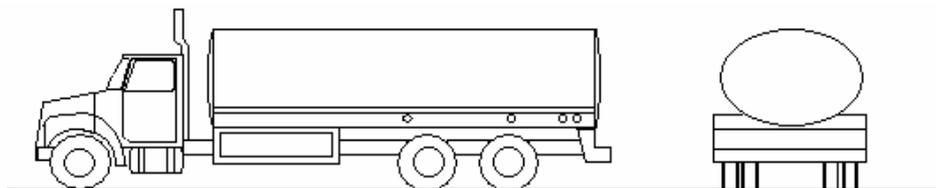
---

La producción de combustibles líquidos es una actividad de gran importancia para el desarrollo económico del país [1]. La creciente demanda por estos materiales ha obligado a incrementar la cantidad de combustibles disponibles para satisfacer las necesidades energéticas, tanto del sector industrial como del sector transporte. En este contexto, una vez que el combustible es producido, es necesario transportarlo para su consumo hacia las distintas regiones del país a través de terminales de almacenamiento y distribución.

Para lograr que los combustibles estén disponibles en la mayor parte del territorio nacional, se emplean diversos medios de transporte marítimo y terrestre, tales como poliductos, buques-tanque, autotanques y carros-tanque [2]. Por vía terrestre, el medio más utilizado es el carretero, empleando para ese propósito vehículos de servicio de carga pesada denominados *autotanques* [2].

El uso de autotanques se apoya en la utilización de contenedores o tanques especiales. Dichos contenedores presentan en su mayoría formas de sección transversal constante a todo su largo, con secciones elípticas, circulares o una combinación de ambas. El contenedor, conocido también como tonel, se coloca sobre y a lo largo del chasis del vehículo, cuando éste consiste de una sola unidad (camión o vehículo unitario). Para el caso de vehículos articulados, el contenedor se monta sobre otra unidad, la cual es remolcada por una unidad tractiva, conformando vehículos simple o doblemente articulados, ya sea una o dos las unidades remolcadas, respectivamente.

Aunque se emplean tanques de diversas capacidades volumétricas, una de las más utilizadas en vehículos unitarios es la de 20 mil litros, siendo común la geometría elíptica en la sección transversal. Típicamente, estos vehículos son del tipo C3, es decir, un camión con tres ejes [3]. Dicha configuración se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1**  
**Camión unitario C3 para el transporte de carga líquida.**

El transporte de combustibles líquidos está rodeado de algunas condiciones que deben tomarse en cuenta durante el traslado. Por un lado, con la finalidad de mantener confinado al material y evitar pérdidas, el contenedor debe permanecer sellado durante el recorrido de la unidad, desde el origen hasta su destino. Por otro lado, y debido a los cambios de temperatura y las características de

expansión y volatilidad de los combustibles transportados, se presentan cambios de presión en el interior del tonel.

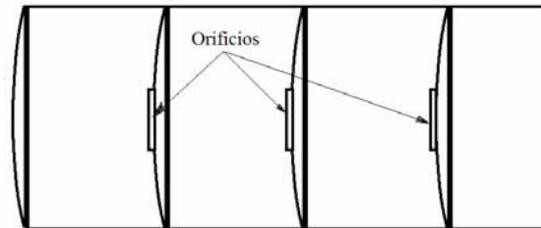
De esta manera, con el propósito de mantener la presión en el tonel bajo límites admisibles y minimizar riesgos, la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), emitió una serie de recomendaciones relacionadas con el nivel de llenado cuando se trasladan materiales con características importantes de expansión y volatilidad [4]. Una de esas recomendaciones se refiere a que el traslado de este tipo de materiales debe ser realizado con niveles parciales de llenado, dejando un espacio libre que actúe como un amortiguador de los gases desprendidos del combustible debido a los cambios en las condiciones dinámicas y térmicas durante el transporte.

Una de las implicaciones asociadas a la existencia de un espacio de expansión, se refiere a la presencia de una superficie libre en el líquido de transporte, la cual proporciona las condiciones para el movimiento del fluido. Debido a la naturaleza del comportamiento de los líquidos dentro de contenedores en movimiento, entre la carga y el contenedor se produce una serie de fuerzas que influyen en el comportamiento dinámico del vehículo en su totalidad. Una de las principales razones de la generación de tales fuerzas es el oleaje del líquido contenido, que surge debido a la inercia del fluido cuando el vehículo realiza un cambio en la dirección de movimiento [5]. Tales interacciones son desfavorables desde el punto de vista dinámico y constituyen un factor de vital importancia para la seguridad, tanto del vehículo y sus tripulantes como para el entorno, debido a los riesgos inherentes que involucra un percance durante el transporte de este tipo de carga [6].

De acuerdo con algunos estudios a nivel mundial realizados en diversas instituciones, las interacciones que se presentan entre el tonel, la carga y el vehículo contribuyen considerablemente en la reducción de los niveles de estabilidad de los autotanques, principalmente en los umbrales de volcadura [7, 8, 9]. Cuando el contenedor presenta un espacio libre de líquido, el movimiento del fluido se manifiesta como un oleaje en la superficie libre. Este oleaje se presenta transversal y longitudinalmente debido a los cambios de velocidad y de dirección, asociados con las maniobras que ejecute el vehículo, como frenados, arranques, cambios de carril, vueltas o evasión de obstáculos.

Las fuerzas generadas por dicho oleaje pueden llegar a ser, de acuerdo con la velocidad y la razón de cambio en la dirección de movimiento, de una magnitud tal que favorezcan la inestabilidad direccional, la pérdida de control de velocidad o la volcadura del vehículo [5, 10, 11]. Por tal motivo, se han propuesto e implementado distintos dispositivos para minimizar tal efecto, entre los cuales se encuentran las barreras físicas que fraccionan el empuje del líquido producido por el oleaje. Tales dispositivos reciben comúnmente el nombre de “rompeolas”, y son construidos comúnmente del mismo material que el del tanque, colocándose como paredes verticales transversales a lo largo del tonel (Figura 2). Adicional al efecto de atenuadores de oleaje, los rompeolas también proporcionan rigidez adicional al

contenedor. En el caso de autotankes para el transporte de combustibles en México, el tanque y los rompeolas son de acero al carbón [7].



**Figura 2**

**Esquemática del arreglo de rompeolas dentro del tonel.**

Aunque este tipo de dispositivos ha tenido gran aceptación en el país, no hay evidencia de estudios relacionados con su ni de su geometría en la atenuación de las fuerzas de oleaje de una manera directa. La efectividad se ha estudiado de manera muy general, evaluando principalmente el desplazamiento del fluido y los valores de las frecuencias naturales del oleaje [12].

Por otro lado, aunque el efecto de estos elementos es benéfico en primera instancia, también presenta algunas desventajas. Una de las principales razones se deriva del hecho de que adicionar material al tonel modifica la distribución de la masa vehicular, lo cual puede influir negativamente en su estabilidad dinámica al aumentar la altura del centro de gravedad. Es aquí donde la selección de los materiales juega un papel importante, pudiendo manejarse como una alternativa para equilibrar las ventajas del uso de elementos rompeolas, con las desventajas de adicionar material que pudiera incrementar la altura del centro de gravedad global del vehículo. Por tal motivo, es importante que durante el traslado de carga líquida se minimicen las fuerzas desestabilizadoras producidas por el movimiento del fluido.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende promover un incremento de los niveles de estabilidad y seguridad en el tránsito de autotankes por carretera, desde la perspectiva del uso de rompeolas. Particularmente, se pretende identificar algunas geometrías y materiales alternativos que puedan sustituir la geometría y material de los rompeolas de los autotankes actuales para el transporte terrestre de combustibles refinados del petróleo como lo son las gasolinas y el diesel.

El escrito, organizado en capítulos y una sección final de conclusiones, describe en primer lugar (capítulo 1), los principales antecedentes reportados en la literatura sobre los hechos e investigaciones en torno al oleaje en contenedores y autotankes. Posteriormente, en el capítulo 2 se exponen aspectos generales sobre escalamiento y similitud, que permiten aplicar un análisis simple del fenómeno a escala. El capítulo 3 presenta el desarrollo de un dispositivo experimental, así como el desarrollo de series de pruebas orientadas a identificar los principales parámetros del oleaje en un contenedor elíptico a escala, involucrando el efecto del uso de rompeolas tradicionales para la atenuación del

movimiento del líquido. Con base en la información obtenida del desarrollo experimental, el capítulo 4 se relaciona con la identificación de materiales alternativos que pueden ser utilizados en sustitución del acero para la construcción de rompeolas. Finalmente, considerando la información en los capítulos previos, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones que pueden dar lugar a una propuesta de materiales y geometría para la construcción de rompeolas en el transporte de combustibles líquidos.

# 1 Antecedentes

---

En este capítulo se revisan algunos aspectos para ubicar la investigación en el contexto del transporte de líquidos. Se incluye una revisión de las investigaciones sobre el tema y el impacto potencial del presente trabajo.

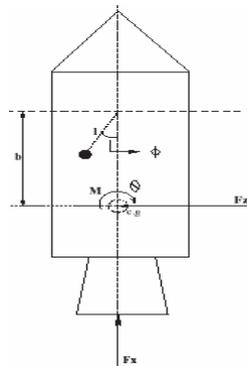
## 1.1 Aspectos generales del oleaje de líquidos

### 1.1.1 Estudio del movimiento de fluidos en contenedores

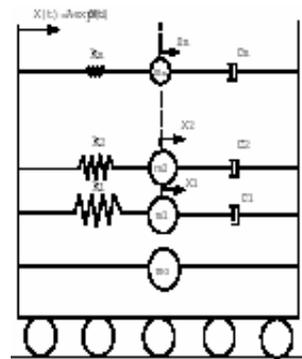
Las características del movimiento de los fluidos cuando son confinados en el interior de contenedores en movimiento, influyen directamente en el comportamiento dinámico de los vehículos en los cuales van montados. Adicionalmente, el efecto de estas interacciones puede contribuir al daño hacia los elementos del contenedor [13].

Desde hace varios años, diversas investigaciones se han enfocado a la comprensión de los aspectos mecánicos de la interacción carga líquida–vehículo, con la finalidad de obtener información relevante que permita predecir el comportamiento del fluido y, con esto, establecer medidas para su control. Entre esas investigaciones se encuentran las que han tratado de simular el comportamiento de los fluidos contenidos mediante el uso de diversas analogías mecánicas. Tal es el caso del comportamiento de masas concentradas en movimiento libre, de péndulos o conjuntos masa-resorte. Algunas de esas aplicaciones se muestran en la Figura 3 [14, 15, 16].

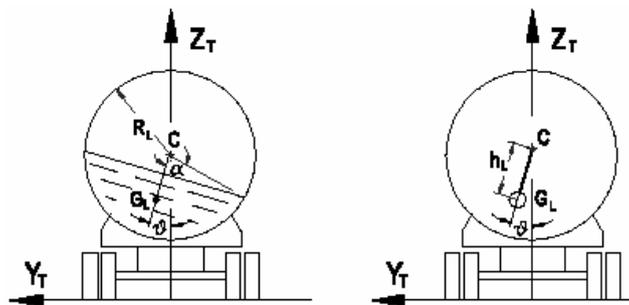
Aunque las investigaciones sobre este tema han surgido en diversas ramas de la ingeniería, en la década de los 60's los principales esfuerzos se aplicaron en el campo de la aeronáutica [17, 13]. En ese tiempo, la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) solicitó la organización y preparación de una monografía que pudiera contener la mayor parte de la información conocida hasta entonces sobre el fenómeno de oleaje y otros aspectos relacionados. El estudio se encomendó al *Southwest Research Institute* (SwRI), quien había trabajado en este tema desde antes del inicio del programa espacial de los EUA, cuyo departamento de Ciencias Mecánicas era líder en el estudio del fenómeno de oleaje [17]. La monografía, publicada en 1966, probó ser extraordinariamente popular siendo, por tanto, distribuida rápidamente [18]. Este documento se convirtió en una de las principales referencias para el estudio del comportamiento de fluidos dentro de contenedores en movimiento, requiriendo ser reimpressa en varias ocasiones.



a) Analogía con péndulo simple en estudios aeroespaciales [14]



b) Analogía con masas concentradas, resortes y amortiguadores [15]



c) Analogía con péndulo simple para representar el movimiento del centro de gravedad de carga líquida [16]

**Figura 3**

**Ilustración de algunas analogías para representar el movimiento de fluidos dentro de contenedores.**

El principal motivo que llevó a la NASA a las investigaciones de oleaje, se relacionaba con el movimiento de grandes cantidades de combustible líquido necesario para el abastecimiento de las naves aeroespaciales. Este movimiento, de acuerdo con la magnitud de las fuerzas generadas, podía influir en el comportamiento dinámico del vehículo. De acuerdo con información obtenida, la falla de varios vehículos espaciales tipo "booster" se atribuyó a una inadecuada supresión del oleaje [13]. Esto es, el movimiento del fluido inducía problemas de control direccional de los vehículos espaciales.

La industria aeroespacial no es la única que se ha enfrentado a los problemas derivados del movimiento de fluidos dentro de contenedores. Actualmente, uno de los sectores que realiza estudios relacionados con este comportamiento es la industria del transporte. De manera particular, se ha dado especial atención al transporte de materiales combustibles en estado líquido por vía terrestre. Estos estudios se han enfocado a la derivación de información que permita comprender el comportamiento del fluido durante su transporte, con el propósito de establecer mejores medidas para su control e incrementar, consecuentemente, los niveles de estabilidad de los vehículos destinados para esa tarea.

## 1.1.2 Comportamiento de vehículos pesados

La designación de *vehículo pesado* se da a aquellos vehículos de carretera diseñados para transportar grandes volúmenes de carga y peso. En México, un vehículo se considera pesado si su peso bruto vehicular es mayor de 4 toneladas [19]. Los vehículos pesados constituyen uno de los medios más utilizados en la actualidad para el transporte de carga. Con la finalidad de satisfacer esta demanda, la tendencia del diseño se orienta a incrementar su capacidad para soportar mayor peso. Este incremento contribuye a su vez al aumento de la masa vehicular, comparados con los de uso ligero. Consecuentemente, el comportamiento de ambos tipos de vehículos también presenta diferencias, resaltando las correspondientes a la estabilidad dinámica.

De acuerdo con algunas investigaciones, una de las características de desempeño dinámico de los vehículos pesados es el umbral estático de volcadura (*SRT, Static Rollover Threshold*), que puede considerarse como un indicador global del grado de estabilidad del vehículo. Este umbral se refiere a la aceleración lateral máxima que puede experimentar un vehículo en una maniobra de seguimiento de una trayectoria curva en estado estable, justo antes de alcanzar la volcadura [20]. Típicamente, el *SRT* se expresa en múltiplos de la aceleración de la gravedad, denotados por *g*'s ( $1\text{ g} = 9,8066\text{ m/s}^2$ ).

Aunque las recomendaciones sobre el valor aceptable del *SRT* en vehículos pesados conducen a valores por arriba de 0,4 *g*'s, en la práctica se sitúa aproximadamente dentro del intervalo de 0,2 a 0,5 *g*'s [8]. En casos extremos, algunos estudios han encontrado situaciones incluso por debajo de ese intervalo [21]. Respecto a los vehículos ligeros, el umbral se ubica generalmente en el intervalo de 0,8 a 1,4 *g*'s [8, 22]. Aunque estos valores son representativos, proporcionan una idea general sobre la magnitud de la diferencia en los niveles de estabilidad que existe entre estos tipos de vehículos.

Actualmente, en el país existen normas de tránsito que restringen el peso, medidas y velocidades de circulación en los vehículos de servicio pesado [3]. Sin embargo, el cumplimiento de tales reglas no los exenta de eventualidades durante el trayecto, en las cuales se pone a prueba tanto las habilidades del conductor para controlar la unidad, como las características del vehículo para soportar dichas situaciones extraordinarias. Por tal motivo, es importante establecer medidas que contribuyan con el aumento de los niveles de estabilidad dinámica de este tipo de vehículos.

## 1.1.3 Efecto de la carga líquida en la estabilidad

Aunque existen diversos factores que influyen en el aumento o disminución del grado de estabilidad de los vehículos, en los de servicio pesado la cantidad y el tipo de carga es uno de los factores que más influencia presenta directamente con los niveles mencionados.

Generalmente, cualquier tipo de carga influye sobre la respuesta dinámica del vehículo que la transporta. El caso de materiales en estado líquido presenta características particulares que contribuyen generalmente a la disminución de los niveles de estabilidad del vehículo que los transporta, principalmente cuando el contenedor es llenado parcialmente. Para el caso de niveles de llenado completo, la carga líquida se aloja en la totalidad del espacio del contenedor, y puede ser considerada como una carga sólida. Bajo tales circunstancias, el estado físico de material de transporte no presenta una mayor influencia sobre la estabilidad del vehículo que los efectos que ejerce una carga en estado sólido, argumento sustentado básicamente por la ubicación fija del centro de masa de la carga en el contenedor.

Por otro lado, debido a los cambios necesarios de dirección durante el transporte, a niveles de llenado parcial se generan condiciones que provocan el movimiento de la carga líquida, provocando que el fluido se desplace hacia el espacio libre y, por tanto, desplazando el centro de masa del volumen líquido. Este desplazamiento influye en la estabilidad del vehículo, ya que el desplazamiento lateral del centro de masa produce alteraciones en la distribución de carga en los lados de los ejes afectando los umbrales de volcadura, mientras que el desplazamiento longitudinal puede producir cambios repentinos en la velocidad de avance, alterando la estabilidad direccional. En ambos casos, se compromete la seguridad del vehículo y la de su entorno durante su tránsito.

Además del efecto sobre la estabilidad, el fluido en movimiento interactúa físicamente con las paredes del contenedor. De acuerdo con las características del movimiento, se presentan interacciones intermitentes con las paredes que, dependiendo de su magnitud, pueden influir en mayor o menor medida en los niveles de estabilidad del vehículo completo, además de poner en riesgo la integridad estructural de sus elementos.

#### **1.1.4 Transporte de combustibles líquidos por carretera**

Una de las actividades donde los niveles de estabilidad juegan un papel por demás importante debido a la magnitud del riesgo involucrado, lo constituye el transporte de materiales líquidos cuya clasificación entra en la de materiales peligrosos.

De estos productos, los combustibles juegan un papel importante para el crecimiento de la economía del país. Gran parte de la energía necesaria y consumida para su desarrollo y avance es proporcionada por combustibles líquidos, principalmente aquellos derivados del petróleo. En el ámbito de las gasolinas, el INEGI menciona que el volumen de ventas internas de este material en el periodo de 1990 a 2004 pasó de 443,8 mil a 636,7 mil barriles diarios. Asimismo, el volumen de ventas internas de diesel en el mismo periodo pasó de los 210,1 a los 302,7 miles de barriles diarios [23].

Con el fin de que todas las regiones puedan disponer de los combustibles necesarios, en México se cuenta con diversos medios para realizar su traslado a

cada una de esas regiones. Entre las alternativas utilizadas se encuentra el uso de oleoductos, buques y ferrocarriles. Aunque esas opciones ayudan en el cumplimiento de la actividad de transporte, su uso se encuentra limitado debido a cuestiones de accesibilidad para ciertos destinos, en los que su aplicación no es técnica y ni económicamente factible.

Una de las alternativas que actualmente tiene gran demanda para el movimiento de materiales de este tipo es el transporte carretero. Una ventaja del empleo de vehículos de carga pesada es su capacidad para desplazarse por lugares imposibles de alcanzar por otros medios, ya sea por la falta de la infraestructura adecuada, por seguridad o por costo.

Para el transporte de materiales en estado líquido, el tipo de vehículos carreteros que se utilizan es el denominado vehículo autotanque. Algunos ejemplos de este tipo de vehículos se muestran en la Figura 4.



a) Vehículos autotanque del tipo C3 con contenedor de 20 mil litros



b) Vehículos autotanque del tipo articulado con variación en la geometría y capacidad del contenedor (T3S3)

**Figura 4**

### **Algunos ejemplos de vehículos autotanque.**

De acuerdo con algunas recomendaciones de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) las cuales, entre otras cosas, restringen el nivel de llenado en el transporte de materiales con fuertes características de expansión y volatilidad, los contenedores de los vehículos destinados a esta actividad deben contar con un espacio adicional al volumen ocupado por el material de carga [4]. El porcentaje de este espacio se ubica entre el 4 y el 6% del volumen total ocupado por la carga. Este volumen adicional permite alojar los vapores emanados del líquido de acuerdo con las características de expansión y volatilidad como respuesta a cambios ambientales y dinámicos durante su transporte. La presión generada por la expansión de los vapores, de acuerdo con la necesidad de hermeticidad de los contenedores, debe mantenerse dentro de límites controlables.

Como la anterior, las recomendaciones de la OIML han sido tomadas como norma por una de las empresas mexicanas más importantes en la producción y

transporte de combustibles líquidos. En consecuencia, el traslado de este tipo de materiales se realiza a niveles parciales de llenado.

La condición derivada del cumplimiento de esta norma involucra la generación de una superficie libre en el fluido de transporte. En condiciones de tránsito del autotanque, como respuesta del líquido al movimiento del vehículo, se producen oscilaciones que tienen lugar principalmente en la parte superior y que se conocen como oleaje. El oleaje se define como el movimiento periódico de la superficie libre de un líquido en un tanque o contenedor parcialmente lleno [13]. El líquido con esta libertad de movimiento puede producir fuerzas que causan aceleraciones adicionales al vehículo, que en eventos extraordinarios puede alcanzar una magnitud tal que conduzca a comportamientos dinámicos impredecibles. Las cargas de empuje del fluido en las direcciones longitudinal y transversal, así como el constante reacomodo del centro de gravedad del fluido, pueden afectar drásticamente los niveles de estabilidad.

### **1.1.5 Medidas para la supresión del oleaje**

Con la finalidad de minimizar la influencia de la carga fluida en la estabilidad dinámica del vehículo, se han propuesto distintas alternativas de modificación al contenedor tendientes a minimizar el movimiento del fluido dentro del contenedor durante el transporte, entre las que destaca el uso de rompeolas. Estos elementos han sido ampliamente aceptados en los últimos años. Los rompeolas se componen de placas transversales colocadas en el interior del contenedor, cuyo propósito es impedir el movimiento libre del fluido cuando el vehículo se encuentra en tránsito. Asimismo, los rompeolas proporcionan una rigidez adicional al contenedor. La Figura 5 muestra imágenes de tales elementos.



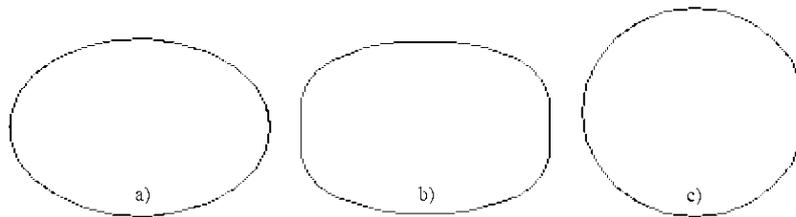
**Figura 5**

**Rompeolas utilizados en el autotransporte de combustibles [7].**

Conceptualmente, estas barreras contribuyen a atenuar las fuerzas derivadas del oleaje al fraccionar el volumen de fluido en movimiento, frenando parcialmente el movimiento por la interacción mecánica con los rompeolas.

El uso de rompeolas no está generalizado en todo el transporte de líquidos. Existen casos en los que su implementación no es recomendada, siendo incluso prohibida. Sin embargo, su restricción de uso generalmente no obedece a cuestiones de estabilidad vehicular, sino a aspectos de higiene, como es el caso del transporte de líquidos comestibles [8].

Para enfrentar el problema del oleaje, se han planteado otras alternativas basadas en la geometría transversal del tanque, con el propósito de minimizar el área superficial que promueva el oleaje y disminuya el desplazamiento del centro de gravedad [24]. También se han propuesto y aplicado compartimientos sellados en un mismo contenedor, útil cuando se realizan entregas parciales de la carga, o el uso de materiales de relleno para restringir el libre movimiento del fluido, entre otras [8]. De estas alternativas, una de las observadas en México, son variaciones en la geometría transversal del tonel. Las principales geometrías utilizadas comúnmente para la construcción de los contenedores que se utilizan actualmente en el país para el transporte de combustibles líquidos se muestran en la Figura 6.



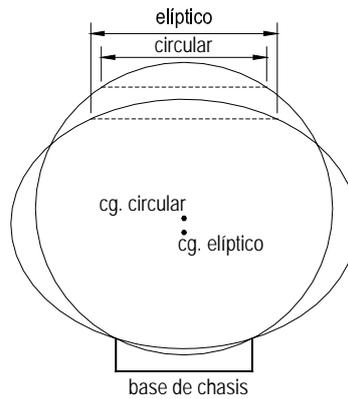
**Figura 6**

**Ilustración de las distintas geometrías transversales utilizadas en contenedores en México: a) elíptica; b) elíptica modificada; y c) circular.**

De las geometrías mostradas, la circular y la elíptica constituyen un gran porcentaje de las utilizadas actualmente en el transporte de combustibles líquidos; sin embargo, de estas dos últimas, la elíptica, con una relación entre ejes mayor y menor de alrededor de 0,74 [7], es la que se utiliza en mayor medida para la construcción de contenedores de este tipo.

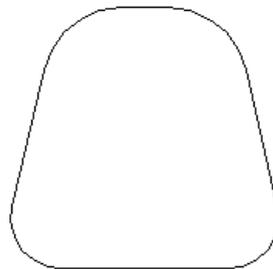
El uso de la geometría elíptica, en contraste con la circular, propone inherentemente ciertas ventajas y desventajas. Al promover la menor altura del centro de gravedad (cg.) por un lado [8], proporciona una mayor área de superficie libre del fluido, como se ilustra en la Figura 7.

Con la finalidad de incrementar los niveles de estabilidad de vehículos autotanque disminuyendo la altura del centro de gravedad de la carga y minimizando la transferencia lateral de fuerzas [24], se propuso una modificación significativa de la geometría transversal del contenedor. Esta geometría, generada en el *Concordia Center for Advanced Vehicle Engineering (CONCAVE)* en la *Concordia University* en Canadá, se muestra en la Figura 8.



**Figura 7**

**Comparación entre geometías circular y elíptica al 94% llenado.**



**Figura 8**

**Geometría transversal propuesta por CONCAVE [24].**

De acuerdo con algunos estudios, esta geometría propone una menor variación en el centro de gravedad de la carga fluida, incrementando la respuesta direccional y la estabilidad ante la volcadura de vehículos autotanque parcialmente llenos [25].

### **1.1.6 Rompeolas transversales en autotanques**

A pesar de que el uso de rompeolas en autotanques para el transporte de combustibles líquidos ha tenido gran aceptación debido a los aparentes aportes en la eliminación de oleaje, es importante tomar en cuenta las implicaciones que acompañan a su empleo. Una de ellas corresponde a la masa adicional proveída por los rompeolas, constituyendo un incremento en el peso “muerto” del tonel y la modificación de la distribución de la masa vehicular. Por la posición del tonel sobre el chasis del vehículo, este incremento de masa contribuye en el incremento de la altura del centro de gravedad, con la correspondiente disminución en la estabilidad del vehículo. Para evitar esa condición, es conveniente reducir la masa respectiva a estos elementos.

Con base en el propósito de atenuar el oleaje, la aplicación de rompeolas carece de sentido cuando el líquido de transporte ocupa completamente el interior del tonel. Sin embargo, durante el traslado en condiciones de llenado parcial, su utilización puede proporcionar grandes ventajas si se emplean de manera racional.

El uso de rompeolas transversales en autotanques en México se ha hecho de manera tradicional desde los diseños originales de toneles para el transporte de combustibles líquidos, desde el inicio de la década de los 40's. Las modificaciones efectuadas en los toneles hasta la actualidad han sido aplicadas a ligeros cambios en la geometría y capacidad del contenedor, con mayores refuerzos estructurales, acondicionamiento de accesorios de monitoreo y control del llenado, entre otros, pero sin alterar la idea original de rompeolas transversal. Aunque se han efectuado estudios que involucran el uso de rompeolas dentro de los contenedores, éstos no han sido orientados a evaluar la eficiencia de dichos elementos y su geometría, en la atenuación del oleaje.

Como parte de esas carencias, no se cuenta con información sobre la magnitud de las fuerzas de oleaje y su variación bajo distintas condiciones de llenado parcial y escenarios de operación.

Estudios previos han mostrado que las cargas críticas atribuidas al oleaje se presentan a niveles de llenado cercanos al 75%, para el caso de oleaje en la dirección longitudinal en tanques elípticos. Por otro lado, en el caso de oleaje transversal, se estima que las cargas críticas se presentan a niveles alrededor del 60% para tanques de sección transversal circular [26].

Debido a que la magnitud de las cargas encontradas en la dirección longitudinal supera en gran medida a la magnitud de las actuantes en la dirección transversal [27], el uso de elementos atenuadores de oleaje se ha caracterizado por su implementación para restringir el movimiento de la carga sólo en la dirección longitudinal.

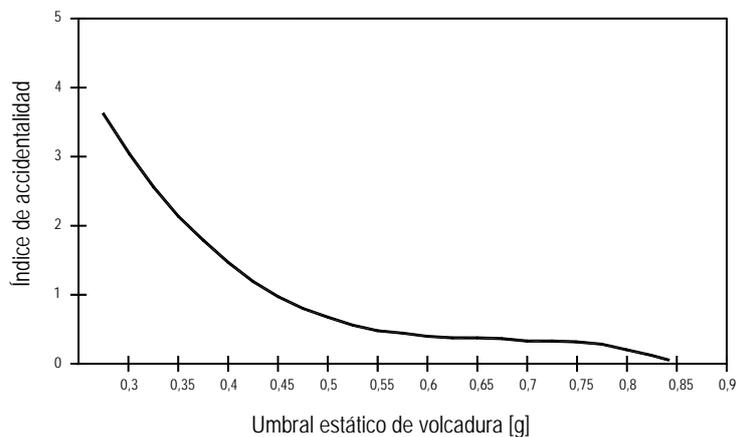
Actualmente en México no se cuenta con información sobre las cargas reales que actúan sobre cada uno de los elementos rompeolas, sin embargo, estos elementos han sido utilizados comúnmente y no se han reportado fallas en ellos debidas a resistencia insuficiente del material y de los elementos por completo. Estos hechos indican que las características del material son, por lo menos, suficientes para resistir las cargas encontradas en esta aplicación, aunque existe también la posibilidad de que se tenga material innecesario en el vehículo que modifica la distribución de masa de la unidad. Por otro lado, tampoco se cuenta con información sobre las ventajas en la disminución del oleaje, propuestas por el arreglo actualmente utilizado de rompeolas en comparación con arreglos distintos donde se involucre un número y geometría distintos.

En el caso de oleaje lateral, algunos investigadores han propuesto distintas medidas para minimizar el movimiento del fluido en esta dirección, entre las cuales se mencionan la implementación de rompeolas de principio semejante a los transversales [8, 27]. Entre las desventajas se encuentran las de adición de material, generalmente en la región superior del tonel, lo cual incrementa la altura del centro de gravedad y modifica la distribución de masa.

### 1.1.7 Incremento de la estabilidad de vehículos pesados

De acuerdo con estudios de caracterización del comportamiento dinámico de vehículos, el riesgo de sufrir un accidente se relaciona fuertemente con el umbral de volcadura. Aunque este hecho es más que evidente, la correspondencia que guarda no lo es tanto. Según una publicación de la *University of Michigan Transportation Research Institute* (UMTRI), la relación entre el valor del umbral y el riesgo de volcadura en vehículos pesados, es no lineal [8]. En ciertos intervalos, una pequeña mejora en el umbral se refleja en cambios mayores en la estabilidad.

Un estudio realizado en Nueva Zelanda con vehículos pesados [28], mostró un comportamiento similar en cuanto a la relación entre el índice de accidentes con el grado de estabilidad del vehículo. Un esquema de la tendencia de un gráfico tomado del documento generado por dicha investigación se muestra en la Figura 9. Este índice de accidentalidad se asocia a la probabilidad de que ocurra un tipo de accidente en el que un solo vehículo se ve involucrado.



**Figura 9**  
**Relación grado de estabilidad-accidentalidad.**

De la tendencia de estos comportamientos, es posible obtener grandes ventajas en la disminución del grado de accidentalidad de vehículos pesados con pocos incrementos en sus niveles de estabilidad, especialmente en aquellos cuyos valores son menores.

## 1.2 Transporte de combustibles por carretera

### 1.2.1 Niveles de seguridad de autotanques

Uno de los principales medios para el transporte de combustibles líquidos ha sido el uso de vehículos pesados del tipo autotanque. La necesidad de transportar mayores volúmenes de carga ha promovido que se diseñen vehículos y componentes para albergar mayores cantidades de carga líquida, de tal manera que el conjunto vehículo-tonel permita el incremento en la capacidad portadora de la unidad. Con excepción de la capacidad del tonel, otros aspectos de su

construcción han sido parcialmente ignorados y han evolucionado con mínimas modificaciones, como es el caso de los rompeolas, de sus materiales y sus medios de fijación.

Para el caso del transporte de materiales en estado líquido, los niveles de estabilidad vehicular se ven afectados por las características del comportamiento de los fluidos cuando éstos encuentran restricciones mínimas a su movimiento. La situación cobra mayor importancia cuando el material de transporte es peligroso, como es el caso de las gasolinas y el diesel.

Debido a la ocurrencia de algunos accidentes en México y al riesgo inherente en el transporte de combustibles líquidos, se ha generado la preocupación por elevar los niveles de seguridad de autotanques al circular por carretera, (Figura 10).



**Figura 10**

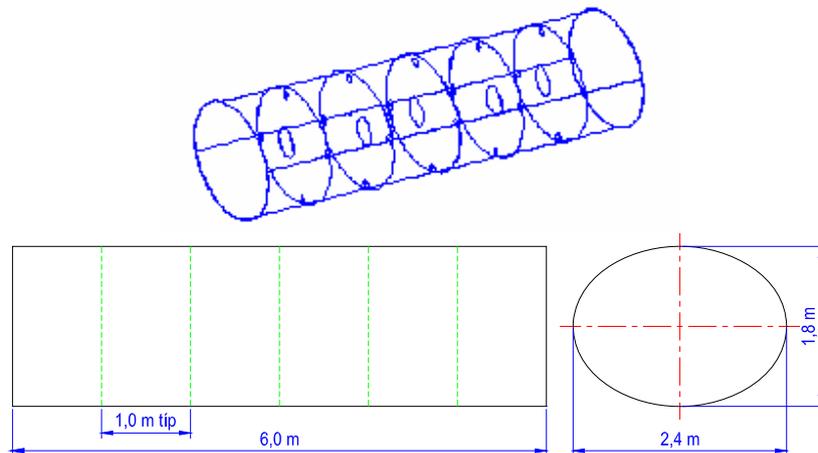
**Ejemplos de accidentalidad en vehículos para el transporte de combustibles líquidos.**

Con ese propósito, se han encaminado algunos estudios para determinar y entender el comportamiento dinámico de estos vehículos, contribuyendo a disminuir las causas de accidentalidad. Un estudio reciente sobre ese tema [7], ha analizado algunas de las características de estabilidad de los autotanques y planteado sugerencias para mejorarlas. Sin embargo, el estudio no incluye aspectos que sustenten el uso, en términos de geometrías, número o material de fabricación, de los rompeolas tradicionalmente empleados.

## **1.2.2 Configuración actual del tonel**

Uno de los aspectos que caracteriza a los vehículos destinados al transporte de materiales en estado líquido es el tipo de contenedor utilizado para albergar la carga. Las geometrías que presenta este tipo de contenedores comúnmente corresponden a formas prismáticas con diversas formas para la sección transversal. Los toneles utilizados para el transporte de combustibles líquidos en México (principalmente gasolinas y diesel), incluyen secciones transversales elípticas, circular o con modificaciones con base elíptica. Esta variedad de geometrías para la construcción de los toneles, se ha hecho principalmente para incrementar, por un lado, la estabilidad vehicular tratando de disminuir la altura del centro de gravedad del tonel y, por otro, para la consecución de mayor capacidad volumétrica mediante el incremento en sus dimensiones.

En México se utilizan toneles que varían en capacidad volumétrica, siendo uno de las más comunes de sección transversal elíptica y 20 mil litros de capacidad. Este tonel se coloca sobre el chasis de un vehículo unitario tipo C3, cuyas dimensiones típicas se muestran en la Figura 11 [7].



**Figura 11**  
**Dimensiones típicas del tonel y ubicación de rompeolas [7].**

En el interior del tonel se encuentran separados uniformemente, en forma transversal, cinco elementos rompeolas, como se aprecia en la Figura 11. Estos elementos cuentan con orificios que permiten el intercambio de líquido entre compartimentos, al igual que facilitan las labores de limpieza. Aunque existe información sobre la geometría de construcción de los rompeolas [7], en la práctica se encuentran diversas variaciones en la forma de éstos; sin embargo, es común que el contorno elíptico de los mismos ajuste perfectamente dentro del tonel.

### **1.2.3 Material de tonel y rompeolas**

El principal material para la fabricación del tonel, es el acero laminado. Con el mismo tipo de acero se construyen, además, los rompeolas. La ventaja principal del acero para esta aplicación radica en que su procesamiento es ampliamente conocido y relativamente económico. Además, sus propiedades de resistencia proporcionan una ventaja para su uso en estos elementos. Por otro lado, aunque es un material con pocas características para evitar la corrosión, su uso con gasolinas o diesel no representa riesgos significativos sobre el desarrollo de ese fenómeno. Sin embargo, en ocasiones el ingreso de humedad dentro del tonel, con o sin combustible transportado, es difícil de evitar.

Específicamente, el acero utilizado en tonel y rompeolas es un acero de bajo carbono, clasificado como AISI 1010 [7]. Además de ser apto para soportar las cargas de la interacción con el fluido, la colocación transversal de los rompeolas contribuye a mantener la geometría del contenedor. La unión del rompeolas con el

tonel se realiza con un proceso simple de soldadura, tomando ventaja del uso del mismo material en rompeolas y tonel.

Existen algunos aspectos que deben ser considerados al utilizar acero, principalmente en los rompeolas. Uno de ellos es la masa necesaria para su construcción. Para un contenedor elíptico con capacidad nominal de 20 mil litros, el peso adicionado por los rompeolas fabricados en acero representa aproximadamente el 10% de la masa total del contenedor [7]. De acuerdo con la ubicación de los rompeolas, la ubicación del centro de gravedad se ve afectada en un sentido negativo para la estabilidad del vehículo, repercutiendo en las características de manejabilidad y control direccional.

La información disponible sobre los criterios de uso de rompeolas, no muestra una clara contundencia para utilizar un número determinado de rompeolas o, aún más, una geometría definida que proporcione mayores ventajas de atenuación del movimiento de la carga. Por tales motivos, puede inferirse que la utilización actual de geometría y arreglo de rompeolas es hasta cierto punto arbitraria.

Con la finalidad de incluir las ventajas en la atenuación del oleaje longitudinal que propone la utilización de rompeolas, sin considerar efectos transversales, se ha propuesto sustituir el material de construcción de estos elementos por otro que proponga el uso de una menor cantidad de masa. Adicionalmente, el ahorro en masa podría derivar en la utilización de nuevos elementos que minimicen el movimiento lateral del fluido, incrementando con esto las cualidades de estabilidad y de control direccional del vehículo.

#### **1.2.4 Selección de materiales**

Desde la perspectiva del diseño mecánico, uno de los principales aspectos a considerar a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica, es la capacidad de soportar las fuerzas a las que va a estar expuesto el elemento. En el caso de contenedor y rompeolas, el acero proporciona la suficiente resistencia para impedir el derrame del fluido contenido y resistir las cargas de trabajo durante el transporte. Incluso en situaciones críticas, el material de construcción del tonel ha jugado un papel importante para la preservación del habitáculo del conductor, además de su función de retención de la carga en eventos de accidentes en que han participado autotanques [7].

Además de la resistencia del material previa a su aplicación, es necesario tomar en cuenta su capacidad para retener sus propiedades en y durante su vida de operación normal. Aunque existe una amplia gama de materiales con las capacidades mecánicas para obtener un diseño ligero, resistente y compacto para la construcción de elementos rompeolas, algunas desventajas se derivan tanto del costo como de la exposición al entorno de trabajo.

Materiales como el aluminio, el acero y algunos plásticos, han probado ser aptos para trabajar en contacto con combustibles como las gasolinas y el diesel. En la industria automotriz estos materiales han sido utilizados para la construcción de

algunas partes del sistema de combustible, incluyendo tanques de almacenamiento, principalmente para reducir el peso vehicular [29, 30]. Aunque el polietileno de alta densidad (HDPE) ha presentado algunos problemas de permeabilidad en la construcción de tanques, respecto a la satisfacción de las normas de emisión de gases [29, 31], la permeabilidad no influye en su utilización como material de rompeolas. Entre las principales desventajas de este grupo de materiales se encuentra la relativamente baja resistencia, la cual puede ser compensada por las bajas densidades.

De los materiales metálicos, el acero es uno de los más populares, ya que posee propiedades mecánicas adecuadas para resistir las cargas a las que son sujetos estos elementos. Sin embargo, la adición de peso accesorio representa una de sus principales desventajas desde el punto de vista dinámico. Por otro lado, puesto que el aluminio presenta características mecánicas como una mejor relación resistencia-peso que el acero, éste puede significar ventajas en la construcción de rompeolas, aunque es necesario tomar en cuenta otros aspectos que pudieran ser de interés, como la compatibilidad electroquímica entre este material y el del contenedor.

### **1.3 Objetivo**

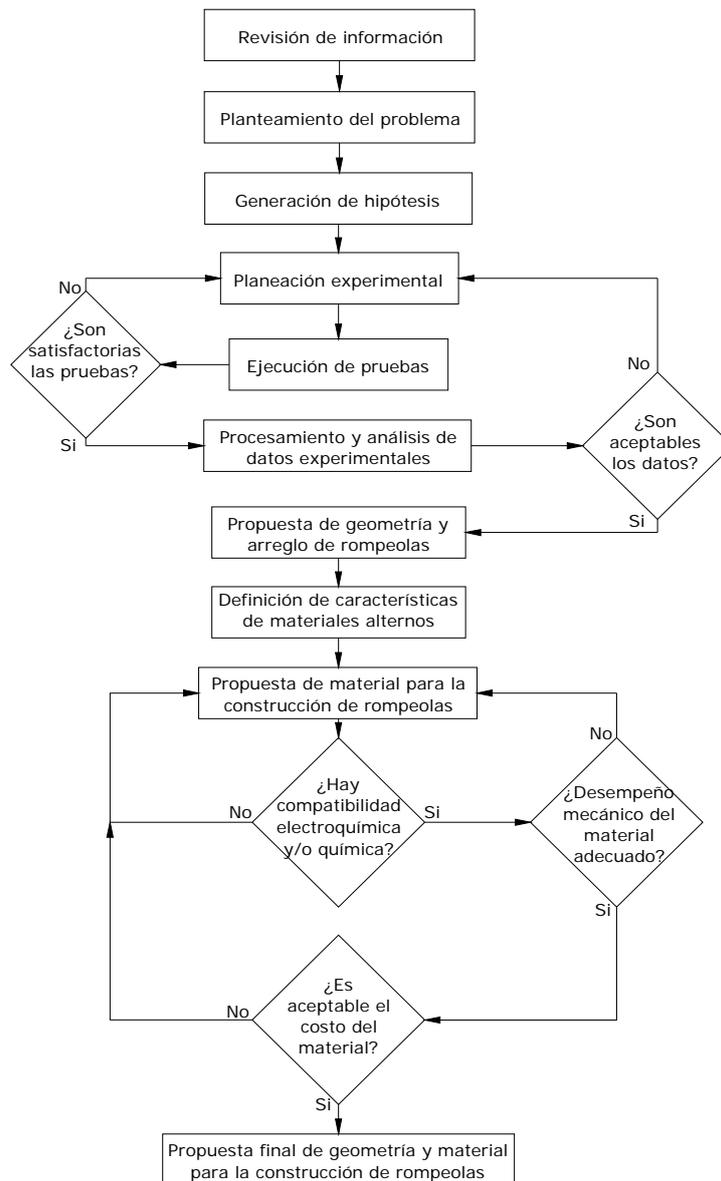
Este trabajo fue desarrollado como parte de la búsqueda de estrategias de mejora del diseño de autotanques y del incremento de los niveles de seguridad durante el transporte de combustibles líquidos por carretera. La investigación tuvo como objetivo *presentar una propuesta de geometrías y materiales alternativos para la construcción de rompeolas que, además, representen una mejora factible en la estabilidad y seguridad en tránsito de vehículos autotanque para el transporte de combustibles líquidos.*

Para el logro de este objetivo se plantearon diversas metas asociadas a distintas etapas contempladas para el desarrollo del proyecto. Las principales fueron:

- Entender el comportamiento de los fluidos dentro de contenedores en movimiento para la generación de hipótesis de solución al problema.
- Determinar las características de un diseño experimental adecuado para su aplicación en un modelo de tonel a escala, en el estudio de parámetros de rompeolas y su interacción mecánica con el líquido contenido.
- Determinar el efecto longitudinal del nivel de llenado del tonel, así como el efecto de la geometría y configuración de rompeolas en la atenuación del oleaje.
- Proponer diseños alternativos de rompeolas (forma, material y disposición) para atenuación del oleaje en autotanques.
- Seleccionar una configuración de rompeolas que proponga mayores ventajas en cuanto a cantidad de material, atenuación de oleaje y facilidad de adaptación.

Identificar materiales alternos, compatibles tanto con el líquido transportado como con el material del tonel, que puedan sustituir al acero en la construcción de rompeolas transversales y longitudinales, con semejante o mejor desempeño mecánico, logrando con lo anterior un diseño más ligero.

El siguiente diagrama muestra, esquemáticamente y de manera general, las acciones consideradas para alcanzar el objetivo propuesto.



## **1.4 Alcances del estudio**

El presente estudio proporciona una propuesta de geometría y material, para la construcción de rompeolas destinados a utilizarse en toneles para el transporte de combustibles en estado líquido derivados del petróleo. Los datos del comportamiento del oleaje se obtuvieron de la experimentación con un modelo de tonel a escala 1:10, fabricado con referencia a los actualmente utilizados por vehículos autotanque para este tipo de carga. Por tanto, los resultados obtenidos pretenden ser aplicables a ese tipo de vehículos autotanque, con un tonel cilíndrico de sección transversal elíptica y cuya capacidad volumétrica se ubica en el orden de los 20 mil litros.

La información presentada puede, además, ser útil para contribuir al mejoramiento de la estabilidad de vehículos que transportan otro tipo de fluidos, así como a toneles con distintas capacidades de carga.

El estudio fue realizado, en su mayor proporción, con apoyo del Instituto Mexicano del Transporte, a través del Área de Dinámica Vehicular de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural. El mismo forma parte de un proyecto de investigación de mayor alcance en dicho Instituto, relacionado con el efecto del oleaje en la estabilidad dinámica de vehículos autotanque.

## 2 Consideraciones para el análisis de rompeolas

---

El trabajo se divide en dos partes principales. La primera trata de la selección de una geometría de rompeolas y su arreglo dentro del tonel, de tal manera que se identifiquen configuraciones que proporcionen mayores ventajas en cuanto a la atenuación del movimiento de oleaje. Consecuentemente, la segunda parte se relaciona con la selección de materiales para la construcción de rompeolas, tomando como referencia al material actualmente utilizado para su construcción.

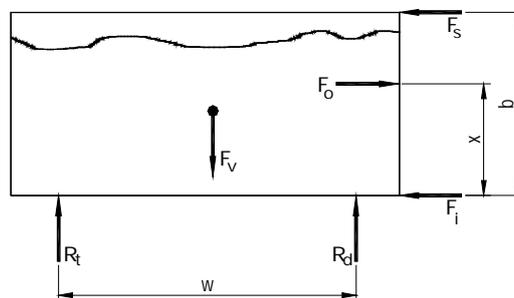
La idea principal para la selección de geometría y arreglo de rompeolas dentro del tonel, consiste de un desarrollo experimental. Bajo este esquema de experimentación, el objetivo es obtener información para validar una nueva geometría y arreglo de rompeolas, o, en su defecto, ratificar el uso de rompeolas y configuración convencionales dentro del tonel.

### 2.1 Esquema conceptual

Debido a que los rompeolas actuales son utilizados principalmente para la supresión del movimiento del fluido en la dirección longitudinal del tonel, el esquema experimental trata de la generación de información sobre las cargas debidas al oleaje en dicha dirección. Para esto, es necesario que el fluido sea excitado y pueda presentarse el oleaje. Una vez que se tiene el movimiento del fluido al interior del contenedor, es necesario obtener datos sobre la forma en que dicho movimiento se atenúa bajo distintas condiciones.

Es importante resaltar que en este trabajo experimental no se pretende obtener valores de la fuerza sobre cada uno de los rompeolas, sino un registro del empuje total provocado por el oleaje del fluido.

Para la obtención de estos datos se planteó el esquema conceptual que se muestra en la Figura 12 [32].



**Figura 12**  
**Esquema conceptual para la evaluación de la atenuación del oleaje.**

En la esquematización, una vez que el fluido presenta oleaje, la fuerza atribuida a éste, representada por  $F_o$ , puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$F_o = F_s + F_i \quad (1)$$

Adicionalmente, conociendo ambas reacciones también es posible encontrar la ubicación de la fuerza de oleaje mediante un cálculo de suma de momentos como se muestra a continuación:

$$x = F_s * b / F_o \quad (2)$$

Debido al interés sobre el movimiento longitudinal del tonel, las reacciones  $R_t$  y  $R_d$ , así como la fuerza  $F_v$ , representan una participación no significativa para los alcances del análisis en la investigación.

Bajo el esquema propuesto, para la generación del oleaje se consideró la puesta en movimiento de un contenedor a velocidad constante, el cual fue posteriormente detenido de manera súbita, produciendo con esto el oleaje del fluido de prueba. Sin embargo, la ejecución de pruebas sobre un vehículo autotanque del tipo utilizado para el transporte de líquidos, el comportamiento del fluido se vería afectado además por otras variables, como las del sistema de suspensión, lo cual incrementa el grado de dificultad. Adicionalmente, siendo tal vez el aspecto de mayor consideración, el costo de la ejecución de pruebas en un vehículo de este tipo se estima fuera del alcanzable del proyecto actual. En el mismo contexto, la construcción de un tonel a escala 1:1 presenta distintos inconvenientes, siendo determinantes el costo, tanto de construcción y materiales, como de infraestructura, equipo y del tiempo requerido para desarrollar todo el proceso.

Tomando en cuenta las dificultades mencionadas, se consideró la posibilidad de construir un modelo a escala reducida, con referencia en un contenedor típico en el transporte de combustibles líquidos en México. Aunque el efecto del escalamiento es importante en estudios experimentales, debido a la escasa información sobre las características del movimiento de fluidos dentro de contenedores típicos en México y de datos reales para posibles calibraciones, este aspecto se consideró con poca profundidad. No obstante, se llevó a cabo un análisis dimensional para obtener una aproximación del comportamiento del contenedor.

## **2.2 Generalidades del escalamiento de fenómenos**

Con el objetivo de descifrar el mundo que la rodea, la ciencia ha desarrollado diversas maneras para estudiar y con ello comprender el comportamiento de los fenómenos físicos.

Una de las formas en que se ha afrontado el estudio de los diversos fenómenos ha sido mediante la división del fenómeno en partes esenciales y a partir de ellas inferir el comportamiento del conjunto. Igualmente, en algunas situaciones se ha visto en la necesidad de considerar algunas suposiciones acerca del fenómeno de

estudio. Además, debido a la complejidad algunas veces encontrada en este tipo de investigaciones, en ocasiones se ha recurrido a la utilización de analogías, modelos y simulaciones.

Como en cualquier otro tema, el uso de estas herramientas puede ser benéfico, si es que se utilizan de la manera adecuada; de lo contrario, los resultados obtenidos pueden producir conclusiones erróneas.

### **2.2.1 Ventajas y desventajas de los modelos a escala**

Desde el punto de vista económico, la construcción de modelos a escala, principalmente escalas reducidas, ofrece ventajas que van desde bajos costos de construcción de prototipos hasta menor tiempo y capacidades de dispositivos necesarios para la ejecución de pruebas. Consecuentemente, las modificaciones en el prototipo también pueden simplificarse.

Las ventajas propuestas por el empleo de modelos a escala sugieren que éstos sean considerados antes de iniciar alguna investigación. Esto es con la finalidad de evitar problemas que pudieran resultar demasiado costosos al experimentar con un dispositivo “real”.

Sin embargo, aunque el uso de modelos a escala puede proporcionar varias ventajas, no debe asumirse que éstos proporcionan respuesta a todos los cuestionamientos relacionados con el fenómeno que se está modelando.

### **2.2.2 Análisis dimensional**

El análisis dimensional es un método mediante el cual es posible deducir información acerca de un fenómeno a partir de la suposición de que el fenómeno puede ser descrito por una ecuación dimensionalmente correcta entre ciertas variables. En la mayoría de los casos es posible encontrar una solución parcial a casi cualquier problema; sin embargo, el sólo uso del razonamiento dimensional no proporciona una solución completa.

El resultado del análisis dimensional de un problema es una reducción del número de variables en el mismo. La ventaja principal detrás de esta reducción puede ser revelada si se considera la cantidad de trabajo que es requerida para la determinación experimental de una función. Una función de una sola variable puede ser graficada como una simple curva. Una función de dos variables se representa como una familia de curvas, comúnmente llamada carta, una curva corresponde a un valor de la segunda variable. Una función de tres variables es representada mediante un conjunto de cartas, una carta por cada valor de la tercera variable. Una función de cuatro variables se representa por un conjunto de cartas y así sucesivamente. Si por ejemplo, se requieren cinco puntos experimentales para graficar una curva, entonces, para graficar una carta de cinco curvas se requieren 25 puntos; para graficar un conjunto de 5 cartas, 125, etc.

La situación rápidamente se vuelve inalcanzable, particularmente si cada punto experimental implica un alto costo, lo cual no es inusual. Evidentemente, una reducción del número de variables en un problema, amplifica grandemente la información que se obtiene de un pequeño número de experimentos. Por tales motivos, el análisis dimensional se ha convertido en una herramienta matemática muy importante de la experimentación [33].

### **2.2.3 Homogeneidad dimensional**

Una ecuación es dimensionalmente homogénea si la forma de la ecuación no depende de las unidades fundamentales de medición [33, 34]. Un ejemplo de esto es la ecuación para el periodo de oscilación de un péndulo simple ( $T = 2\pi (L/g)^{1/2}$ , donde L es la longitud del péndulo y g es la aceleración de la gravedad) la cual es válida ya sea que la longitud sea medida en pies, metros o millas y si el tiempo es medido en minutos, días o segundos. Por lo tanto, por definición, la ecuación es dimensionalmente homogénea.

Puede deducirse de la definición anterior de homogeneidad dimensional, que una ecuación de la forma  $x = a + b + c + \dots$  es dimensionalmente homogénea sí y sólo si, las variables  $x, a, b, c, \dots$  tienen la misma dimensión [33, 34, 35].

Sin embargo, aunque una ecuación que contiene una suma o una diferencia de dos o más términos con dimensiones distintas se considera errónea, no debe asumirse que una función empírica posee necesariamente homogeneidad dimensional [33].

### **2.2.4 Comentarios generales acerca del análisis dimensional**

La teoría del análisis dimensional es una teoría matemática y es puramente algebraica. La aplicación del análisis dimensional a un problema práctico se basa en la hipótesis de que la solución del problema puede expresarse mediante una ecuación dimensionalmente homogénea en términos de variables específicas. Esta hipótesis se justifica por el hecho de que las ecuaciones fundamentales de la física son dimensionalmente homogéneas, y que las relaciones que se deducen de tales ecuaciones son consecuentemente dimensionalmente homogéneas. Sin embargo, no debe suponerse simplemente que una ecuación desconocida es dimensionalmente homogénea, a menos que se sepa que contiene todas y cada una de las variables que pudieran aparecer en una derivación analítica de la ecuación.

Por ejemplo, en el problema del arrastre de un cuerpo esférico en una corriente de aire, puede argumentarse que la densidad y la viscosidad pueden ser descartadas debido a que son constantes para el aire estándar. La ecuación de la fuerza de arrastre podría entonces ser de la forma,  $F = f(V, D)$ , siendo V la velocidad de la corriente de aire y D es el diámetro del cuerpo. Sin embargo, es imposible construir una ecuación dimensionalmente homogénea de esta forma y sólo con

estas variables, debido a que ellas,  $V$  y  $D$ , no contienen dimensiones de fuerza o masa, lo cual es imprescindible para relacionarlas con la fuerza [33].

Entre las primeras consideraciones para realizar el análisis dimensional se encuentra el decidir las variables que deben ser tomadas en cuenta. Este es un problema con el cual hay que tener cuidado. Si se introducen variables que realmente no afectan el fenómeno, la ecuación final puede contener demasiados términos adimensionales. Por otro lado, si se omiten en el análisis algunas variables que en realidad presentan una influencia importante en el fenómeno, los cálculos pueden conducir a resultados incompletos o erróneos. Aún cuando algunas variables son prácticamente constantes, como la aceleración de la gravedad, pueden ser esenciales debido a que se combinan con otras variables activas para formar productos adimensionales, como se verificó en el ejemplo de la fuerza de arrastre del cuerpo esférico mencionado.

Para tomar en cuenta sólo el número adecuado, o una buena aproximación a éste, de las variables que sí influyen de manera importante en un fenómeno, es necesario entender lo suficiente acerca del problema para explicar la razón y la manera en la cual la variable tiene influencia en el fenómeno. Antes de emprender con el análisis dimensional de un problema, se debe tratar de formular una teoría del mecanismo del fenómeno. Algunas veces, una teoría simple puede revelar las acciones de las variables más importantes. Por otro lado, si las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno son conocidas, éstas deben mostrar las variables importantes para el análisis [33].

### 2.2.5 El teorema de Buckingham

Evidentemente, cualquier ecuación que relacione los productos adimensionales es dimensionalmente homogénea; esto es, la forma de la ecuación no depende de las unidades de medición fundamentales [34]. Esta observación puede ser formalmente expresada como sigue [33]:

*Una condición suficiente para que una ecuación sea dimensionalmente homogénea, es que ésta sea reducible a una ecuación entre productos adimensionales.*

E. Buckingham dedujo el principio fundamental de que las condiciones de este teorema son también necesarias. El teorema de Buckingham se enuncia como sigue [33]:

*Si una ecuación es dimensionalmente homogénea, ésta puede reducirse a una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales.*

El teorema de Buckingham resume la teoría entera del análisis dimensional. Sin embargo, los principios del análisis dimensional fueron empleados antes de que este teorema fuese enunciado. En 1899 Lord Rayleigh hizo una aplicación ingeniosa del análisis dimensional, para analizar el problema del efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un gas [33]. Aunque el método de Rayleigh es aparentemente distinto del de Buckingham, éste obtiene los mismos resultados.

Si  $n$  variables son relacionadas por una ecuación dimensionalmente homogénea, el teorema de Buckingham permite concluir que la ecuación puede expresarse en forma de una relación entre  $n-r$  productos adimensionales, en los cuales  $n-r$  es el número de productos en un conjunto completo de productos adimensionales de las variables [33, 34, 36]. En la mayoría de los casos,  $r$  es igual al número de dimensiones fundamentales en el problema. Sin embargo, esto no puede ser considerado como una regla, debido a que el número de dimensiones fundamentales en un problema puede depender del sistema de dimensiones fundamentales que es utilizado. Por ejemplo, problemas del análisis de esfuerzo usualmente envuelven solo dos dimensiones, fuerza [F] y longitud [L]. Sin embargo, en el sistema másico, la fuerza es una cantidad derivada y posee la dimensión  $[MLT^{-2}]$ , siendo [M] masa, [L] longitud y [T] tiempo las dimensiones fundamentales.

### **2.2.6 Características de los modelos a escala**

Cuando las partes de un modelo poseen las mismas formas correspondientes al prototipo, es decir, cuando la relación de todas las dimensiones correspondientes entre modelo y prototipo es igual, se dice que los dos sistemas son geoméricamente similares [37]. Generalmente, la similitud geométrica es la más simple de obtener en modelos de todos los tipos. Sin embargo, existen algunas aplicaciones donde la obtención de la similitud puede presentar problemas a la hora de tratar de modelar el fenómeno. Ejemplos de tales casos los constituyen los ríos, estuarios y bahías los cuales, al ser construidos a escalas relativamente pequeñas pueden presentar un comportamiento influenciado fuertemente por la tensión superficial. En consecuencia, ese tipo de modelos son construidos frecuentemente de una manera distorsionada, esto es, que el factor de escala geométrica no se mantiene para todas las direcciones.

En general, existe una correspondencia punto a punto entre un modelo y su prototipo. En terminología geométrica, dos puntos correspondientes se conocen como puntos homólogos [33]. Este concepto conduce inmediatamente al de figuras homólogas y partes homólogas. Figuras o partes en el modelo y el prototipo se dice que son homólogas si están compuestas de puntos homólogos. Cuando un fenómeno transitorio ocurre en un modelo, es necesario introducir el concepto de tiempos homólogos. En cualquier fenómeno cíclico, los tiempos homólogos para un modelo y su prototipo, son instantes que ocurren a la misma fracción del ciclo.

El concepto de similaridad se extiende a muchas características más allá de la geométrica. Por ejemplo, puede ser especificado que la distribución de la masa en un modelo sea similar a la masa en el prototipo. Esto significa que la razón de las masas de partes homólogas, debe ser una constante que no depende de la elección de las partes [33].

### 2.2.7 Similitud completa

Un estudio en un modelo proporciona información cualitativa sobre las características del prototipo. Usualmente, también se busca información de tipo cuantitativa. Los modelos pueden ser clasificados de acuerdo con los tipos de datos cuantitativos que intentan proporcionar. En muchos casos, el principal resultado del estudio en un modelo a escala es sólo un valor numérico. Un buen ejemplo de esto es la carga máxima que un elemento puede soportar antes de romperse.

El valor numérico que se obtiene a través de la ejecución de pruebas en un modelo, depende de los valores de las variables independientes involucradas en el problema.

Supóngase que  $n$  variables están relacionadas por una ecuación dimensionalmente homogénea. Esto puede ser escrito como  $f(q_1, q_2, \dots, q_n)=0$ , siendo  $f$  una función desconocida.

El teorema de Buckingham afirma que, puesto que la ecuación es dimensionalmente homogénea,  $f$  no es una función de las  $n$  variables separadamente, sino que lo es de un conjunto completo de productos adimensionales de las variables. Esto es, se puede concluir que la ecuación puede ser expresada en la forma de una relación entre  $n-r$  productos adimensionales, donde  $n-r$  es el número de productos en un conjunto completo de productos adimensionales de las variables. Lo anterior puede escribirse como [33]:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r})=0 \quad (3)$$

Si se desea conocer un valor en particular de  $\pi$  que corresponde a valores numéricos específicos de  $\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r}$ , es posible obtener el resultado mediante la ejecución de una prueba en el modelo, si es que las variables adimensionales  $\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r}$  presentan los mismos valores para el modelo y el prototipo. Es entonces que el modelo y el prototipo se dicen completamente similares. Obviamente, la similitud completa es imposible de alcanzar si no se cuenta primero con la similitud geométrica.

Generalmente, la similitud completa no es factible de alcanzar en un modelo de prueba. Consecuentemente, algunas de las variables adimensionales independientes, las cuales se piensa que tienen una influencia secundaria o que afectan al fenómeno de una forma conocida, pueden tener desviaciones permisibles de sus valores correctos [33, 34]. Sin embargo, puede suceder que algunas variables que no muestran un efecto marcado en el fenómeno real, sí lo hagan en el fenómeno a escala. Un ejemplo sería la tensión superficial. Influencias de este tipo son llamadas efectos de escala. Los efectos de escala ocurren, en cierta forma, en casi todos los modelos de prueba. La mejor forma de contrarrestarlos es mediante la construcción de modelos tan grandes como sea posible.



## **3 Prototipo de tonel y experimentación**

---

Con la finalidad de aprovechar las ventajas que brinda la experimentación en modelos a escala reducida, se decidió construir un dispositivo ad hoc. Para esto fue necesario establecer los requisitos iniciales que permitieran obtener un modelo representativo del fenómeno de prueba.

### **3.1 Consideraciones generales del dispositivo de prueba**

Entre las consideraciones principales se encuentran los requisitos necesarios para que el dispositivo sea factible de construir según los objetivos. Estos requisitos pueden ser listados de la siguiente manera:

- El modelo debe representar un contenedor típico en el transporte de combustibles líquidos.
- El dispositivo debe emplear materiales de fácil adquisición y ser construido en su totalidad en un taller de máquinas-herramienta convencional.
- El modelo debe permitir la observación del movimiento del fluido interior.
- La escala geométrica debe ser elegida de tal manera que puedan aplicarse dispositivos y equipos de medición, disponibles en el Instituto Mexicano del Transporte.
- El espacio necesario para la ejecución de pruebas debe ser adecuado a las instalaciones y espacios disponibles dentro del centro de investigación mencionado.
- El dispositivo debe ser capaz de resistir cargas de choque sin sufrir daños ni deformaciones aparentes.
- El arreglo instrumental debe proporcionar elementos para registrar la magnitud de las cargas debidas al oleaje del fluido de prueba, bajo una excitación predeterminada.
- El dispositivo debe proporcionar facilidad de trabajo para experimentar con diversos tipos de elementos rompeolas.
- La construcción total del dispositivo de prueba debe ser completada a un bajo costo.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, se proporcionaron las siguientes propuestas y justificaciones.

Aunque en la actualidad en México se utiliza una gran variedad de vehículos autotanke para el transporte de combustibles, una de las configuraciones típicas para el transporte de combustibles por vías carreteras, es el autotanke de 20 mil litros de capacidad nominal. Este autotanke se compone de un vehículo unitario

del tipo C3, con un contenedor montado sobre el chasis, siendo del tipo de mayor uso para el transporte de refinados del petróleo en México.

Debido a su disposición y su relativa facilidad de manejo y conformado, para la construcción del tonel de prueba se utilizó acrílico translúcido de 3mm de espesor, proporcionando también este material la facilidad de observación del movimiento del fluido de prueba al interior del contenedor.

De acuerdo con la información presentada sobre las consideraciones para la construcción de modelos a escala, el dispositivo debe fabricarse a una escala geométrica que resulte en el dispositivo más grande posible. Esto con la finalidad de reducir los denominados *efectos de escala*.

Tomando en cuenta algunas otras consideraciones, como la cantidad de material disponible y el esquema conceptual de las pruebas, inicialmente se propusieron dos factores distintos para el escalamiento geométrico. La primera relación de escala propuesta fue 1:10, seleccionada inicialmente en función de la disponibilidad del material y de la consideración inicial de construir dispositivos adicionales, es decir, réplicas del modelo.

Con la finalidad de reducir los efectos de escala, la segunda relación propuesta fue 1:8; sin embargo, una vez que el dispositivo 1:10 fue construido y probado, la escala 1:8 fue relegada al estimar que la capacidad de algunos de los instrumentos propuestos para el monitoreo de las pruebas contempladas sería rebasada. La Figura 13 muestra algunos de los pasos en la construcción del tonel de prueba.



**Figura 13**

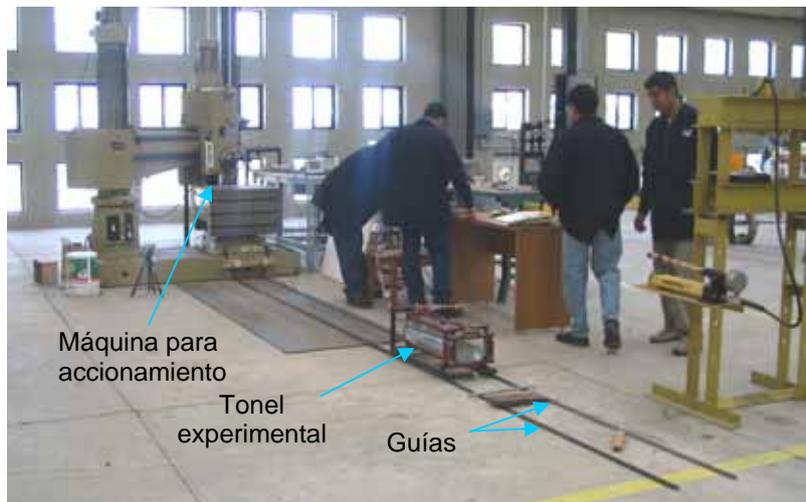
**Algunas etapas en la construcción del tonel de ensayo.**

Para proteger el acrílico de los golpes de impacto y evitar su daño mecánico, se construyó una estructura para contenerlo y para interactuar con el marco principal. El material seleccionado para la estructura de protección fue perfil tubular de acero. La Figura 14 muestra el tonel con la protección mencionada.



**Figura 14**  
**Protección para tonel de ensayo.**

De acuerdo con el esquema conceptual propuesto y la escala geométrica seleccionada, se ubicó un espacio dentro de las instalaciones de los Laboratorios de Desempeño de Vehículos y Materiales del IMT para el montaje de los experimentos. El espacio del que se dispuso, mostrado en la Figura 15, fue de alrededor de 30 m<sup>2</sup>.



**Figura 15**  
**Espacio ocupado para la ejecución de pruebas.**

Finalmente, para facilitar la experimentación de diversos escenarios en cuanto al número y tipo de rompeolas, se colocó al tanque de prueba una tapa posterior, de fácil ensamble y desensamble, de manera que pudiesen ser cambiados los elementos de prueba. En conjunto con la tapa mencionada, se realizaron dos perforaciones en la parte posterior, una en la superior y otra en la inferior, esto con la finalidad de facilitar el proceso de carga y descarga del fluido de prueba.



**Figura 16**  
**Orificios para carga y descarga.**

Considerando la cantidad y tipo de materiales utilizados para la construcción del tonel y accesorios, se concluyó que su construcción se mantuvo muy por debajo del presupuesto asignado, alrededor de los mil pesos.

### **3.2 Análisis dimensional**

Para el análisis dimensional se consideraron las variables siguientes:

$F_o$ : Fuerza de oleaje [N]

Fuerza atribuida al oleaje del fluido

$\sigma$ : Tensión superficial del fluido [ $\text{kg/s}^2$ ]

$v$ : Velocidad característica [m/s]

Velocidad de prueba, impresa al sistema móvil

$L$ : Longitud característica del sistema [m]

Distancia transversal de la superficie libre del fluido

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido [ $\text{kg/m}^*\text{s}$ ]

Al realizar el análisis dimensional, se obtienen dos productos adimensionales, como puede deducirse a partir del teorema de Buckingham.

$$\pi_1 = \frac{F_o}{\sigma L} \quad (4)$$

y

$$\pi_2 = \frac{\mu v}{\sigma} \quad (5)$$

De tal forma que la fuerza de oleaje  $F_o$  es:

$$F_o = \sigma L f\left(\frac{\mu v}{\sigma}\right) \quad (6)$$

Donde  $f$  significa “función de”.

### 3.3 Pruebas de oleaje con un contenedor a escala

Concluida la fabricación del dispositivo de prueba, el siguiente paso consistió en evaluar el desempeño del conjunto ensamblado, bajo el ambiente de las pruebas contempladas. Estas pruebas fueron principalmente orientadas hacia la resistencia estructural del contenedor y marco de protección bajo condiciones de carga súbita. Al obtener resultados favorables, el siguiente aspecto a considerar fueron las fugas de fluido y la facilidad para el cambio de elementos atenuadores dentro del contenedor. Adicionalmente, se hizo un planteamiento de pruebas para observar el comportamiento del fluido dentro del contenedor. Estas pruebas se encaminaron a determinar la fuerza de oleaje del fluido. Un resumen de los resultados de estas pruebas se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1**  
**Resumen de resultados de pruebas de funcionamiento en tonel de prueba.**

Nivel de llenado $n$ [%]	Frecuencia $f$ $F$ [Hz]	Fuerza de impacto $F_{imp}$ [N]	Fuerza de oleaje $F_o$ [N]
50	0,68	19,0	10,0
75	0,84	70,2	11,8
94	1,10	135,6	6,8

De estas pruebas preliminares, se observó que los mayores valores de fuerza se obtienen al nivel de llenado de 75%. Esto concuerda con información obtenida para toneles elípticos con carga fluida [38]. Adicionalmente, la expresión resultante del análisis dimensional (ec. 6), considerando un factor adimensional adicional, proporciona valores con una tendencia similar. Esta tendencia fue evaluada con los siguientes valores, (Tabla 2).

**Tabla 2**  
**Valores para estimación de fuerza en ecuación 6.**

$\sigma$ , Tensión superficial [kg/s <sup>2</sup> ]	$L$ , Longitud [m]	$(\mu)$ Viscosidad, [kg/m*s]	$(v)$ , Velocidad [m/s]	$(n)$ , Nivel de llenado [%]	Relación adimensional	$(F_o)$ , Fuerza [N]
7,26E+02	0,245	8,91E-04	1	50	127	25,0
7,26E+02	0,223	8,91E-04	1	75	158	28,3
7,26E+02	0,154	8,91E-04	1	94	131	16,2
7,26E+02	0,245	8,91E-04	0,5	50	127	17,7
7,26E+02	0,223	8,91E-04	0,5	75	158	20,0
7,26E+02	0,154	8,91E-04	0,5	94	131	11,5
7,26E+02	0,245	8,91E-04	0,1	50	127	7,9
7,26E+02	0,223	8,91E-04	0,1	75	158	9,0
7,26E+02	0,154	8,91E-04	0,1	94	131	5,1

El factor adimensional incluido es una relación entre la longitud superficial transversal del fluido y la altura del centro de masa del mismo con relación a la base del tonel.

Una vez obtenido un comportamiento satisfactorio del ensamble, se procedió con la ejecución de las pruebas diseñadas para evaluar el comportamiento de las geometrías propuestas. El diseño de las pruebas se realizó con apoyo de métodos de diseño experimental [39].

### 3.4 Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un diseño multifactorial completo con cuatro factores [40]. El diseño considera todas las combinaciones posibles de los niveles de cada factor. Las variables y los niveles seleccionados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 2**  
**Variables de prueba y sus niveles.**

Factor Nivel	Número de Rompeolas	Geometría de Rompeolas	Velocidad de Prueba [m/s]	Nivel de llenado (%)
1	0	Tipo ra*	0,1 (v1)	50 (n1)
2	1	Tipo rb*	0,5 (v2)	75 (n2)
3	2	Tipo r*	1,0 (v3)	94 (n3)
4	3	-	-	-
5	5	-	-	-

\*Nota: Las geometrías de los rompeolas se definen completamente en la sección 3.6

Cada prueba consiste en la selección de una geometría de rompeolas, una configuración de los mismos, un nivel definido de llenado del contenedor y una condición de excitación.

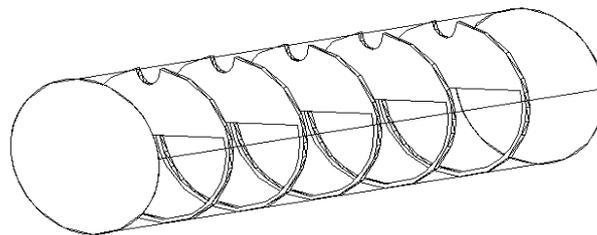
De acuerdo con el diseño experimental y con el número de variables y sus niveles, el número total de combinaciones fue 135 (5x3x3x3). Adicionalmente, a fin de realizar un análisis estadístico, se consideraron tres repeticiones de cada experimento, llegando con esto a 405 pruebas por realizar. Tomando en cuenta la cantidad de pruebas, el tiempo requerido para su ejecución y los arreglos necesarios para cada evento, se aplicó un programa de aleatorización parcial. Por otro lado, durante el desarrollo de las pruebas se decidió no aplicar algunas series debido a que no se observó interacción física entre fluido y rompeolas.

### 3.5 Geometrías alternativas para rompeolas

La geometría actualmente utilizada para la construcción de rompeolas cubre prácticamente la totalidad de la sección transversal del tonel. Por otro lado, el movimiento de oleaje se presenta en mayor medida en la superficie libre del fluido, por lo que es importante incrementar la atenuación del movimiento en esta zona. Lo anterior hace suponer, además, que el oleaje disminuye hacia el fondo del

tonel, por lo que es factible que después de cierta profundidad, no se requiera una barrera para contrarrestar el movimiento del líquido.

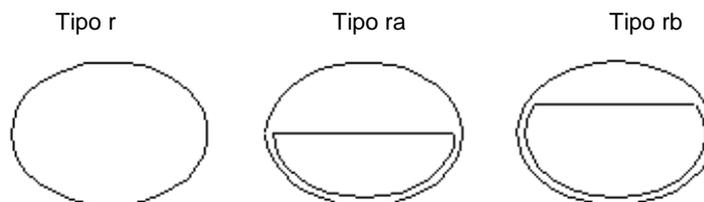
Estas son algunas razones que permiten conducir hacia propuestas de geometrías alternativas para la construcción de rompeolas. Estas geometrías sugieren la interacción del rompeolas sólo en la parte donde es necesaria tal interacción. Una consideración adicional se relaciona con los niveles de llenado con los que normalmente transitan estos vehículos, los cuales se ubican muy cercanamente al 95% de volumen total del contenedor. Este hecho sugiere que el oleaje se presentará sólo en las regiones superiores del contenedor; por tanto, para la experimentación se propusieron algunas geometrías similares a la esquematizada en la Figura 17 para la construcción de rompeolas alternativos.



**Figura 1.**  
**Esquematización de rompeolas alternativos**

### 3.6 Geometrías de prueba

Las geometrías propuestas para la construcción de los rompeolas se muestran en la Figura 18.



**Figura 18**  
**Ilustración de las geometrías utilizadas**

El modelo de rompeolas mostrado a la izquierda de la figura representa una pared completa que divide internamente al tonel, dando lugar a compartimientos prácticamente independientes. Por otro lado, este mismo modelo se toma como representación de los rompeolas actualmente utilizados en los contenedores. Una de las razones por la cual se mantiene esta geometría es que, aunque existe información específica para la construcción de estos elementos, en la práctica es común encontrar geometrías distintas, es decir, la geometría puede variar de contenedor a contenedor.

Otra de las geometrías probadas es la identificada con el tipo "ra". Dado que el oleaje es un fenómeno que se presenta principalmente en la superficie, se ha

propuesto una primera modificación a los rompeolas actuales, proporcionando la geometría aquí presentada. Una de las ventajas evidentes que puede proporcionar el uso de esta geometría es la disminución de material, el cual equivale a un ahorro del 50% comparada con la geometría base. Adicionalmente, la disminución de material se acompaña con una disminución en el peso propuesto por la utilización de estos elementos.

Finalmente, una segunda propuesta de modificación de los rompeolas corresponde al mostrado como tipo “rb” en la figura anterior. Similar a la geometría “ra”, la “rb” representa una disminución de material en un mayor porcentaje. Comparadas con el tipo “r”, ambas presentan ventajas de ahorro de material y en la disminución del peso accesorio del tonel que conlleva a un incremento en los niveles de estabilidad del vehículo al disminuir la altura del centro de gravedad.

Aunque el esquema experimental menciona que se realizaron pruebas con 0, 1, 2, 3 y 5 rompeolas de cada tipo y para cada condición, es importante mencionar que en todos los casos la separación entre elementos rompeolas fue uniforme. Como puede apreciarse del diseño experimental, la consideración de combinar geometrías en las configuraciones de prueba estuvo fuera de los alcances del proyecto, al igual que la variación en la separación entre rompeolas.

### **3.7 Equipo utilizado y descripción de las pruebas**

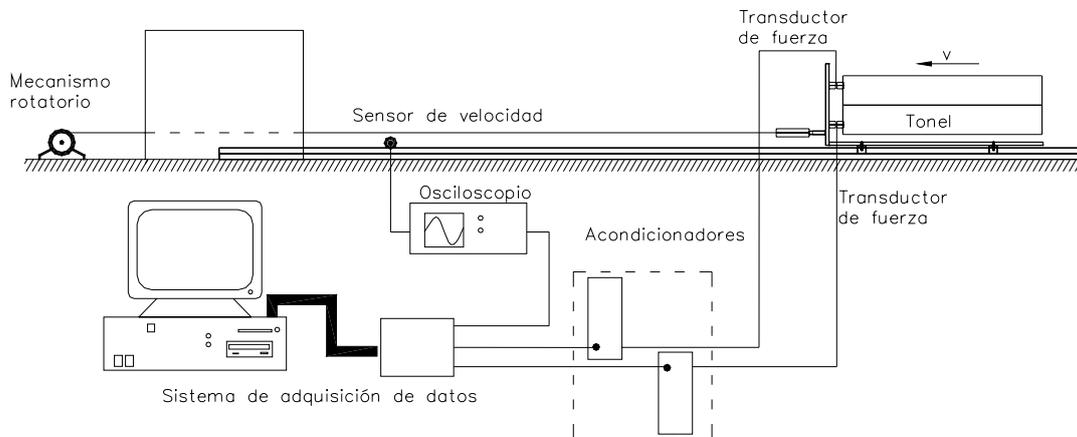
Para la puesta en movimiento del contenedor se utilizó un mecanismo rotatorio de velocidad variable unido al tonel de prueba mediante un cable de acero. Al poner en marcha este mecanismo, el cable se enrolla en una polea y jala al tonel una distancia típicamente de 2,5 m. La capacidad del mecanismo rotatorio permite mantener la velocidad constante, independientemente de la cantidad de masa que sea adicionada al tonel. Al detener el tonel de manera repentina, se permite que el líquido tenga un libre movimiento, el cual se manifiesta como oleaje.

Para la obtención de los datos de interés se emplearon dos transductores de fuerza, simbolizados por las reacciones  $F_s$  y  $F_i$  en el esquema conceptual mostrado en la Figura 12. Para el registro de la información proporcionada por los transductores, se utilizó un sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

Con la finalidad de mantener cada una de las pruebas dentro de límites admisibles, como parte del desarrollo, se realizó un monitoreo de la velocidad instantes previos al paro o choque. De hecho, esta velocidad constituyó uno de los criterios establecidos para la aceptación o rechazo de cada prueba. Para la medición de esta velocidad se adecuaron equipos y un sensor óptico infrarrojo que emitía una señal de registro del paso de dos marcas reflejantes ubicadas a una distancia definida sobre la estructura principal del tonel.

Además de los instrumentos mencionados, se utilizaron también 4 transductores de aceleración; sin embargo, su uso sólo fue con el propósito de tener un mayor control del desarrollo de las pruebas.

Un esquema de los principales elementos se muestra en la Figura 19.



**Figura 19**  
**Esquema de instrumentación.**

El fluido de prueba utilizado agua común. No se utilizó un tipo de combustible (gasolina o diesel) debido a los riesgos inherentes a su manejo y a la compatibilidad con los materiales de construcción del tonel de prueba. Sin embargo, los resultados obtenidos de estas pruebas con agua pueden ser relacionados con experimentos ya realizados en toneles reales [7].

La magnitud de la fuerza de oleaje fue evaluada mediante la comparación de la magnitud de la fuerza registrada por los transductores de fuerza instantes posteriores al paro súbito del tonel.

Con objeto de obtener una referencia sobre la magnitud de la atenuación propuesta por cada configuración de rompeolas, inicialmente se llevaron a cabo pruebas sin el uso de ningún tipo de rompeolas. Además, con la finalidad de discriminar el efecto de la inercia del sistema experimental, se realizaron algunos ensayos para observar el efecto del sistema sin fluido.

### 3.8 Adquisición de datos

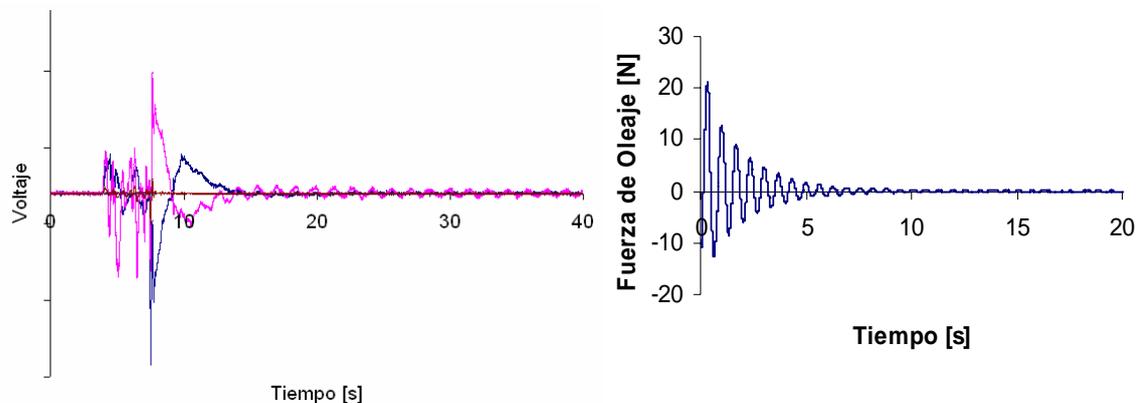
La adquisición de datos se llevó a cabo con una frecuencia de muestreo de 250 muestras por segundo. Pruebas generales preliminares mostraron que la frecuencia de oscilación del fluido no era mayor a 5 Hz. Al término de la serie de pruebas, los datos fueron analizados, organizados y procesados de tal manera que fuese posible identificar la magnitud de la fuerza atribuida al oleaje en la dirección longitudinal del tonel. Esta magnitud, que representa la suma algebraica de las reacciones en los transductores de fuerza, constituye la cantidad de comparación en las distintas pruebas para la evaluación de cada configuración ensayada.

Con la finalidad de que las pruebas contaran con una repetibilidad aceptable, la ejecución estuvo condicionada a obtener valores similares en la velocidad medida.

Se eligió un valor de variación del 5% tomando como base el valor del nivel de velocidad propuesto en cada caso.

### 3.9 Resultados de las pruebas de oleaje

Las mediciones fueron organizadas y los datos procesados posteriormente con la ec. (1). Al ser graficados, se obtuvieron representaciones como las muestradas en la Figura 20. Es importante mencionar que la parte de mayor interés lo constituye la magnitud de las fuerzas posteriores al choque, el cual se encuentra claramente definido en las gráficas.



**Figura 20**  
**Ejemplos de las señales obtenidas.**

En esta figura se muestran dos gráficos. El primero (izquierda) corresponde a la señal tal cual fue adquirida, donde se muestra la variación del voltaje en el tiempo en cada uno de los dos transductores de fuerza utilizados; la línea del pico más alto representa al transductor superior, y la otra, al inferior. El segundo gráfico se refiere a la señal después de haber sido procesada, considerando filtros pasabajas de 5 Hz.

Con los datos obtenidos, es posible identificar también la frecuencia que adquiere el movimiento del fluido después del choque. Este parámetro pudiera ser utilizado para estimar la cantidad de masa en movimiento que provoca el oleaje, tomando en cuenta que a mayor masa en movimiento, la frecuencia disminuye. Sin embargo, puesto que la relación puede no ser directa, deben tomarse mayores consideraciones, dado que las condiciones cambian para distintos niveles de llenado, siendo estos comparativos sólo en llenados similares.

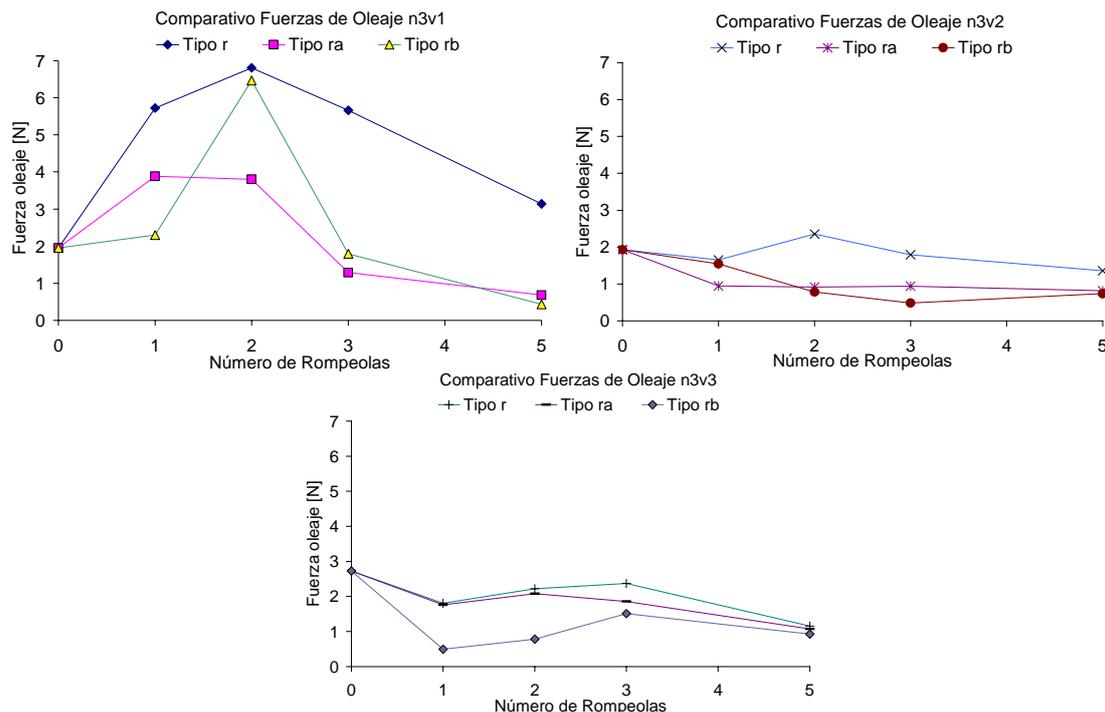
Finalmente, el parámetro de mayor importancia lo constituye la magnitud de la fuerza que se atribuye al oleaje.

En la Tabla 3 se muestran los promedios la magnitud de la fuerza [N], instantes posteriores al choque, considerando series de tres pruebas.

**Tabla 3**  
**Magnitud de la fuerza de oleaje [N], inmediatamente después del choque.**

No Romp	Tipo ra			Tipo ra			Tipo ra		
	r	ra	rb	r	ra	rb	r	ra	rb
0	3,234	3,234	3,234	10,714	10,714	10,714	12,296	12,296	12,296
1	4,411	1,427	0,000	13,247	2,735	7,204	16,571	6,081	11,006
2	4,754	1,222	0,000	13,802	3,173	6,270	17,490	3,445	8,229
3	4,932	1,427	0,000	12,596	2,531	0,000	3,537	3,309	0,000
5	4,278	0,873	1,041	10,051	2,063	4,906	1,882	1,789	7,258
<b>n2v1</b>									
0	3,643	3,643	3,643	14,102	14,102	14,102	13,681	13,681	13,681
1	6,958	1,684	1,365	16,914	6,504	4,902	15,011	7,085	4,725
2	7,485	3,398	1,753	15,315	9,836	3,548	4,056	6,708	4,670
3	7,094	2,027	1,564	12,477	4,739	3,573	2,062	0,728	3,747
5	4,846	3,081	0,646	4,917	3,812	2,208	3,733	1,463	2,483
<b>n3v1</b>									
0	1,952	1,952	1,952	1,932	1,932	1,932	2,725	2,725	2,725
1	5,724	3,886	2,301	1,653	0,951	1,549	1,807	1,760	0,494
2	6,808	3,802	6,468	2,356	0,918	0,786	2,223	2,079	0,782
3	5,660	1,286	1,791	1,797	0,942	0,484	2,372	1,855	1,511
5	3,140	0,679	0,433	1,358	0,818	0,739	1,152	1,073	0,925

En la siguiente figura se muestra gráficamente resultados de la comparación de la fuerza de oleaje para el nivel de llenado 3, correspondiente al 94%.



**Figura 21**

**Relación entre la fuerza de oleaje y el número de rompeolas al nivel 3 (94% de llenado)**

Adicionalmente, se obtuvieron los valores de fuerza para distintos tiempos posteriores al choque. Esto se hizo con la intención de evaluar el grado de amortiguamiento propuesto por cada configuración probada. Las tablas 4 y 5 indican, al igual que la tabla anterior, los promedios de las fuerzas obtenidas.

Los datos considerados corresponden a dos intervalos de tiempo. El primero (Tabla 4) se ubica en el intervalo de 2 a 3 s después del choque; el segundo (Tabla 5) se ubica en el intervalo de 5 a 6 s posterior al choque.

**Tabla 4**  
**Magnitud de la fuerza de oleaje [N], segundo periodo posterior al choque.**

No Romp	Tipo			Tipo			Tipo		
	r	ra	rb	r	ra	rb	r	ra	rb
	n1v1	n1v1	n1v1	n1v2	n1v2	n1v2	n1v3	n1v3	n1v3
0	2,417	2,417	2,417	6,740	6,740	6,740	7,567	7,567	7,567
1	1,676	0,930	0,000	6,151	1,472	4,466	6,944	1,341	5,887
2	0,852	0,520	0,000	2,466	1,656	3,240	3,298	1,546	3,826
3	0,749	0,712	0,000	2,292	1,551	0,000	1,484	1,450	0,000
5	0,361	0,402	1,314	1,325	0,763	2,324	0,551	0,820	2,724
	n2v1	n2v1	n2v1	n2v2	n2v2	n2v2	n2v3	n2v3	n2v3
0	3,285	3,285	3,285	9,627	9,627	9,627	8,806	8,806	8,806
1	2,408	0,616	0,818	6,340	0,625	1,200	6,458	0,837	1,920
2	1,857	0,957	0,723	6,127	2,252	1,321	2,769	1,883	1,738
3	1,624	0,446	0,494	3,893	0,619	1,311	1,383	1,128	1,428
5	0,357	0,396	0,458	1,432	0,811	0,623	2,080	1,132	0,937
	n3v1	n3v1	n3v1	n3v2	n3v2	n3v2	n3v3	n3v3	n3v3
0	2,048	2,048	2,048	1,433	1,433	1,433	1,991	1,991	1,991
1	1,936	0,551	0,463	1,288	0,441	0,480	1,241	1,273	0,880
2	1,655	1,289	0,334	1,497	0,570	0,562	1,556	1,554	1,320
3	0,812	0,677	0,362	1,013	0,469	0,439	1,494	0,939	0,668
5	0,399	0,267	0,421	0,605	0,713	0,338	0,845	1,305	0,789

**Tabla 5**  
**Magnitud de la fuerza de oleaje [N], tercer periodo posterior al choque.**

No Romp	Tipo			Tipo			Tipo		
	r	ra	rb	r	ra	rb	r	ra	rb
	n1v1	n1v1	n1v1	n1v2	n1v2	n1v2	n1v3	n1v3	n1v3
0	2,176	2,176	2,176	5,422	5,422	5,422	4,618	4,618	4,618
1	0,266	0,505	0,000	0,858	0,640	1,778	0,952	0,519	2,045
2	0,485	0,330	0,000	0,978	0,688	1,571	0,782	0,363	1,293
3	0,386	0,386	0,000	0,673	0,579	0,000	0,375	0,475	0,000
5	0,134	0,252	0,590	0,169	0,327	0,886	0,188	0,188	0,768
	n2v1	n2v1	n2v1	n2v2	n2v2	n2v2	n2v3	n2v3	n2v3
0	2,734	2,734	2,734	7,385	7,385	7,385	6,902	6,902	6,902
1	0,688	0,294	0,451	1,942	0,254	0,465	1,294	0,245	0,519
2	0,594	0,437	0,638	1,519	1,478	0,806	1,069	0,823	0,309
3	0,474	0,328	0,229	1,082	0,468	0,316	0,323	0,442	0,264
5	0,202	0,258	0,170	0,215	0,196	0,145	0,430	0,220	0,186
	n3v1	n3v1	n3v1	n3v2	n3v2	n3v2	n3v3	n3v3	n3v3
0	1,319	1,319	1,319	0,756	0,756	0,756	1,067	1,067	1,067
1	0,568	0,187	0,181	0,685	0,193	0,172	0,323	0,246	0,220
2	0,458	0,219	0,251	0,529	0,300	0,288	0,392	0,300	0,293
3	0,298	0,169	0,201	0,246	0,179	0,128	0,305	0,291	0,246
5	0,165	0,112	0,139	0,194	0,135	0,131	0,182	0,193	0,174

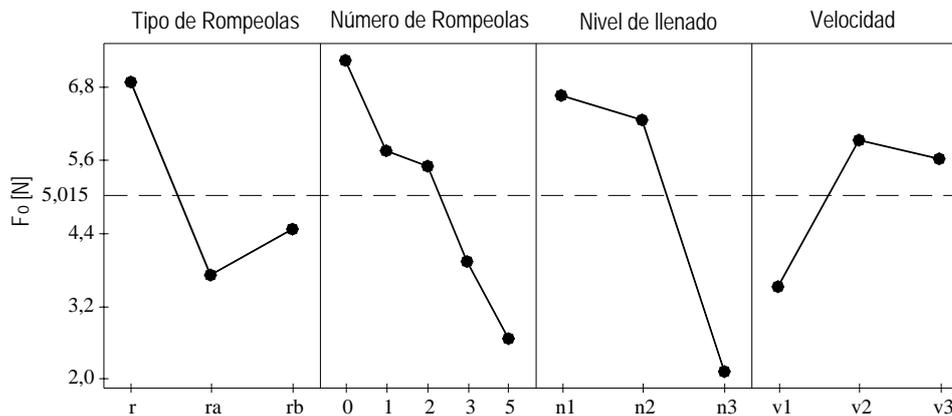
Para el análisis de resultados se consideró sólo valores iniciales, esto es, la magnitud de la fuerza correspondiente al momento inmediatamente después del choque.

### 3.10 Análisis de resultados

Con la finalidad de realizar un análisis estadístico, la información obtenida se introdujo en un software de análisis estadístico para su procesamiento [41]. Este programa proporcionó información sobre los efectos principales de las variables consideradas, además de los efectos de las interacciones entre variables.

Asimismo, se obtuvo un análisis de varianza, lo cual es importante en el proceso de selección de geometría y configuración de rompeolas [42].

**Efectos principales.** Un efecto principal ocurre cuando la respuesta media cambia a través de los niveles de un factor. En la Figura 22 se muestra el gráfico de efectos de este tipo.



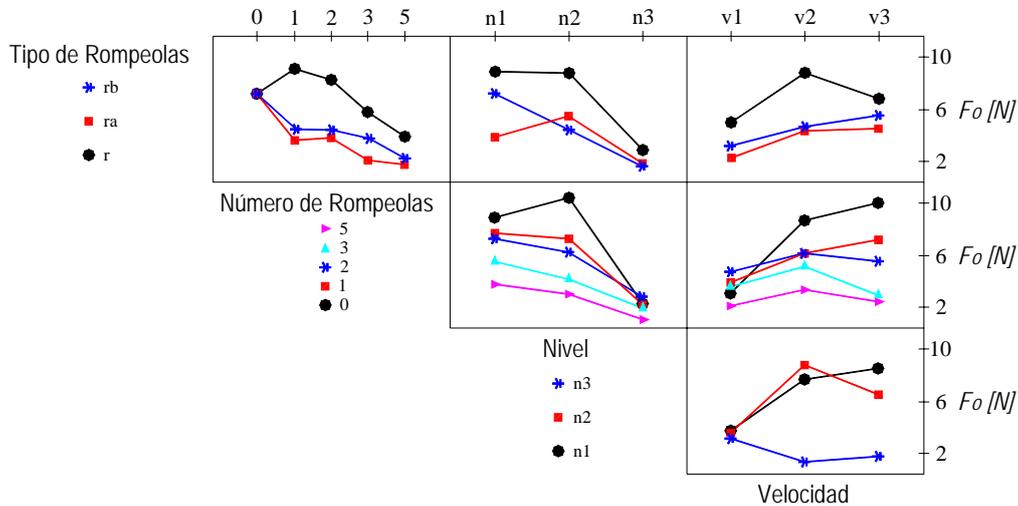
**Figura 22**  
**Gráfica de efectos principales.**

Este gráfico presenta información aislada del efecto de cada una de las variables. De éste se aprecia que la geometría presenta una influencia marcada en la atenuación de la fuerza de oleaje  $F_o$ . Asimismo, se observa que al incrementar el número de rompeolas disminuye  $F_o$ ; sin embargo, las configuraciones de 3 y 5 rompeolas mantienen la fuerza por debajo del promedio. También se aprecia que el nivel 3 (94%) presenta los menores valores de fuerza. Este hecho puede servir para justificar los altos niveles de llenado en el transporte de combustibles de esta categoría. Finalmente, aunque la menor velocidad de prueba muestra menores magnitudes de  $F_o$ , se observa que la velocidad intermedia la incrementa [43, 44].

Por otro lado, debido a la naturaleza de este tipo de gráfico, no puede ser tomado como fuente principal para la generación de conclusiones finales en la selección de geometría y configuración de rompeolas.

**Interacciones.** Una interacción entre factores ocurre cuando el cambio en la respuesta del nivel bajo al nivel alto de un factor, no es el mismo respecto al cambio en respuesta de los mismos dos niveles de un segundo factor.

Una gráfica de interacciones es una gráfica de promedios para cada nivel de un factor, con el nivel de un segundo factor tomado como constante. La Figura 23 muestra una gráfica de este tipo.



**Figura 23**  
**Gráfica de interacciones entre factores.**

En la figura se aprecia la interacción entre los niveles de los cuatro factores. Se observa que generalmente, los rompeolas modificados (ra, rb) presentan mejor comportamiento. Asimismo, esta información conduce a considerar un mayor número de elementos. Para el caso del tipo ra, se tiene que la utilización de 3 elementos es similar a la de 5. Por otro lado, la utilización de 5 elementos del tipo rb también sugiere un buen comportamiento, comparable al de 3 y 5 elementos del tipo ra.

**Análisis de varianza.** El análisis de varianza es un método estadístico para analizar la variabilidad de un conjunto de datos, de tal manera que puedan respaldarse conclusiones objetivas y no de carácter apreciativo. En el proceso de análisis del efecto de un grupo de factores en un desarrollo experimental, se toma la media del valor de cada factor o combinación de factores y se compara con la media general de todos los datos obtenidos. Cuando la diferencia entre los dos valores de comparación es pequeña, la varianza es pequeña. Esto significa que el factor, o combinación de factores en la comparación, tiene un efecto relativamente bajo en la variable medida; en este caso, la fuerza de oleaje. Por otro lado, cuando la varianza es grande, significa que el factor de comparación tiene efecto significativo en la variable medida, es decir, el comportamiento de los datos es sensible al cambio de los niveles del factor y, por tanto, produce mayor variabilidad en los datos medidos.

La tabla siguiente muestra el resumen del análisis de varianza en la forma típica en que se despliegan los resultados. Dicho análisis se efectuó con un porcentaje de confiabilidad del 95%.

**Tabla 6**  
**Resultados del análisis de varianza.**

Fuente	gdl	SC	CM	Fp
Tr	2	745,625	372,813	1523,065
Nr	4	1015,916	253,979	1037,590
N	2	1704,642	852,321	3482,020
v	2	474,100	237,050	968,429
Tr*Nr	8	303,819	37,977	155,150
Tr*N	4	386,945	96,736	395,200
Tr*v	4	119,409	29,852	121,957
Nr*N	8	364,412	45,552	186,093
Nr*v	8	551,293	68,912	281,527
N*v	4	813,675	203,419	831,034
Tr*Nr*N	16	265,699	16,606	67,842
Tr*Nr*v	16	192,617	12,039	49,182
Tr*N*v	8	157,658	19,707	80,511
Nr*N*v	16	331,471	20,717	84,636
Tr*Nr*N*v	32	280,776	8,774	35,846
error	270	66,090	0,245	
Total	404	7774,147		

En esta tabla,

*Fuente:* Se refiere al factor o combinación de factores en el análisis (Tr: tipo de rompeolas; Nr: número de rompeolas; N: nivel de llenado; v: velocidad de prueba).

*gdl:* Grados de libertad de la fuente. Se define  $gdl = n - 1$ , siendo  $n$  el número de niveles de la fuente.

*SC:* Suma de cuadrados. Depende del número de experimentos, de los niveles de la fuente, del valor promedio de cada experimento y de la media total de los promedios.

*CM:* Cuadrado medio. Es el cociente resultante de *SC* entre *gdl* de cada fuente.

*Fp:* Estadístico de prueba. Se calcula como el cociente del *CM* de la fuente entre el *CM* del error.

*Fc:* Estadístico de comparación. Es un valor utilizado como criterio de comparación, que se obtiene de tablas estandarizadas de la distribución "F".

**Tabla 7**  
**Valores del estadístico de comparación *Fc*.**

$Fc_{0,05; 2, 270} =$	3,029
$Fc_{0,05; 4, 270} =$	2,405
$Fc_{0,05; 8, 270} =$	1,973
$Fc_{0,05; 16, 270} =$	1,681
$Fc_{0,05; 32, 270} =$	1,487

Como puede observarse en las tablas 6 y 7, los valores del estadístico de prueba son mayores que su correspondiente estadístico de comparación para un 95% de confiabilidad. Esto significa que todos los factores considerados y sus combinaciones o interacciones, tienen un efecto importante en la variable medida (fuerza de oleaje). Sin embargo, se puede apreciar, de acuerdo con la magnitud del estadístico de prueba, que tanto el tipo de rompeolas ( $Tr$ ), el número ( $Nr$ ) y el nivel de llenado ( $M$ ), son los factores cuyo efecto es de mayor consideración.

Por otro lado, debido a la naturaleza probabilística del análisis de varianza, éste puede no ser utilizado de manera única para la generación de conclusiones prácticas. Estas conclusiones deben considerar también la naturaleza física del desarrollo del fenómeno, así como la factibilidad de aplicación práctica.

### **3.11 Conclusiones sobre la geometría**

Tomando en cuenta los resultados de los análisis mostrados, puede concluirse que, aunque existen distintas configuraciones que presentan, comparativamente, un buen comportamiento de acuerdo con las distintas condiciones tanto de llenado como de número y tipo de rompeolas. Entre las que presentaron un comportamiento aceptable bajo prácticamente cualquier condición, fueron el arreglo de 3 elementos del tipo ra, 5 elementos del mismo tipo y finalmente 5 rompeolas del tipo rb.

Desde esta perspectiva, cualquiera de estas configuraciones es adecuada y presenta ventajas adicionales a los rompeolas convencionales. Sin embargo, esta decisión puede ser refinada un poco más. Para esto se considera la cantidad de material necesario para la construcción de los elementos. A partir de esto, se puede influir en la cantidad de masa añadida al tonel a causa del uso de elementos atenuadores de oleaje. Bajo esta consideración, se observa que la configuración de 5 elementos del tipo ra es la que requiere de mayor cantidad de material.

Para las dos configuraciones restantes, conviene hacer una consideración adicional. Debido a que los toneles actuales utilizan 5 rompeolas, el arreglo de 5 rompeolas del tipo rb es más simple de implementar comparado al arreglo de 3 elementos del tipo ra. Esto es debido a que en los toneles actuales, para obtener rompeolas del tipo rb a partir de los rompeolas convencionales, sólo se requiere una modificación en la geometría; por otro lado, para la implementación de 3 elementos del tipo ra, es necesario tanto modificaciones en la geometría como en su ubicación dentro del tonel. Mientras el primero sólo considera el corte de material excedente, para la segunda configuración, además de retirar el excedente, es necesario reacomodar dos de los elementos.

Por otro lado, considerando la geometría de los rompeolas probados, se calcula que la masa adicionada por el uso de 3 elementos del tipo ra, es mayor a la empleada en la construcción de 5 elementos del tipo rb, en una proporción de 1,2:1.

Tomando en cuenta los hechos anteriores, se concluye que la geometría más adecuada para la construcción de rompeolas es la del tipo rb en un arreglo de 5 elementos.



## 4 Selección de materiales

---

Para traer una idea a la realidad, es esencial apoyarse en el uso de materiales. Según el diccionario [45], materializar significa *concretar, dar realidad*. Los materiales son un elemento de gran importancia en la vida cotidiana. Todas las cosas con las que tenemos contacto diariamente están hechas de materiales.

### 4.1 Aspectos generales

Desde el inicio de la humanidad, el hombre ha dependido constantemente de los materiales para la satisfacción de sus necesidades. Prueba de ello son las etapas que se pueden identificar en el desarrollo evolutivo del hombre, como la era de piedra, la era del cobre, la era del bronce y la era del hierro.

Actualmente, el desarrollo de materiales ingenieriles ha mantenido, e incluso aumentado, esta dependencia. Hoy por hoy, prácticamente todos los productos están hechos de este tipo de materiales, es decir, materiales desarrollados para cumplir con aplicaciones específicas. Cada componente debe ser construido de un material que le confiera características útiles para el desempeño del mismo. La elección del material para la fabricación de cada uno de ellos, constituye una etapa importante en el desarrollo del producto.

El propósito de esta etapa es encontrar el material o conjunto de materiales que más se adecuen a una aplicación. De una buena selección depende el éxito o fracaso del diseño mismo, debido a que esta acción puede ahorrar material, disminuir o evitar procesos de manufactura, o contribuir para lograr diseños más eficientes, lo cual invariablemente se traduce en una reducción de costos.

Para cumplir satisfactoriamente con la selección de materiales dentro del proceso de diseño, es esencial conocer los requerimientos que dichos materiales deben satisfacer. Las propiedades que tales materiales deben poseer para ser considerados en la fabricación de determinado componente, deben también contar con la certeza de que no perderán sus capacidades al ser expuestos a las condiciones de trabajo.

Para el caso de la selección de un material o materiales para una pieza completamente nueva, es necesario realizar un estudio detallado sobre las cargas, el ambiente y las restricciones a las cuales será sometido el componente. Cuando es el caso de aplicar una modificación en una pieza, algunas veces es posible tomar como punto de partida las propiedades del material de la pieza original, siempre y cuando esta acción no interfiera con las razones por las cuales se optó por dicha modificación.

Ya sea seleccionar materiales para una pieza nueva o para una existente, invariablemente se requiere conocer las propiedades de los distintos materiales, con la finalidad de realizar la mejor selección. Algunas ocasiones, la obtención de

propiedades extraordinarias en los materiales tiene un papel primordial; algunas otras, como es el caso de productos consumibles, la disminución en costos juega el rol principal.

### 4.1.1 Tipos y propiedades de clases comunes de materiales

Los materiales disponibles para aplicaciones de Ingeniería pueden ser clasificados en cinco grandes categorías [46]: Metales y aleaciones, cerámicos, polímeros, materiales compuestos y semiconductores. La Tabla 8 muestra las propiedades comunes de la clasificación mencionada.

**Tabla 8**  
**Propiedades comunes de los materiales [46].**

Tipo de Material	Propiedades comunes
Metales	Los metales y sus aleaciones, incluyendo el acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre y níquel, generalmente tienen como característica una buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, una alta rigidez, ductilidad o conformabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades.
Cerámicos	El ladrillo, el vidrio, la porcelana, los refractarios y los abrasivos tienen baja conductividad eléctrica y térmica y a menudo son utilizados como aislantes. Los cerámicos son fuertes y duros, aunque también muy frágiles o quebradizos. Las nuevas técnicas de procesamiento han conseguido que los cerámicos sean lo suficientemente resistentes a la fractura para que puedan ser utilizados en aplicaciones de carga.
Polímeros	Producidos mediante un proceso conocido como polimerización, es decir, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas, los polímeros incluyen el hule, los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Los polímeros tienen baja conductividad eléctrica y térmica, reducida resistencia y no son adecuados para utilizarse a temperaturas elevadas. Los polímeros termoplásticos, en los cuales las largas cadenas moleculares no están conectadas de manera rígida, tienen buena ductilidad y conformabilidad; los polímeros termoestables son más resistentes, aunque más frágiles porque las cadenas moleculares están fuertemente enlazadas. Los polímeros se utilizan en muchas y variadas aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos.
Semiconductores	Aunque el silicio, el germanio y una variedad de compuestos como GaAs son muy frágiles, resultan esenciales para aplicaciones electrónicas, de computadoras y de comunicaciones. La conductividad eléctrica de estos materiales puede controlarse para su uso en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados. Parte de la información hoy día se transmite por luz a través de fibras ópticas; los semiconductores, que convierten las señales eléctricas en luz y viceversa son componentes esenciales de estos sistemas.
Materiales compuestos (Composites)	Los materiales compuestos se forman a partir de dos o más materiales, produciendo propiedades que no se encuentran en ninguno de los materiales de manera individual. El concreto, la madera contrachapada y la fibra de vidrio son ejemplos típicos, aunque algo burdos, de materiales compuestos. Con materiales compuestos es posible producir materiales ligeros, fuertes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, o bien, se pueden producir herramientas de corte duras y a la vez resistentes al impacto, que de otra manera se harían añicos. Los vehículos aéreos y aeroespaciales modernos dependen de manera importante de materiales compuestos como los polímeros reforzados de fibra de carbono (CFRP).

La Tabla 8 presenta una visión muy amplia de las propiedades de distintos tipos de materiales y puede ser útil para realizar una selección general. Sin embargo, en el proceso de identificar un material específico, es necesario considerar algunas características específicas. La Tabla 9 muestra algunas que pueden ser tomadas en cuenta.

**Tabla 9**  
**Algunas propiedades y características para selección de materiales [47].**

Característica	Propiedades	Característica	Propiedades
Mecánica	Dureza Módulo de Elasticidad Relación de Poisson Resistencia de fluencia Resistencia última Curva esfuerzo-deformación	Térmica	Conductividad Calor específico Coeficiente de dilatación Punto de fusión Coeficiente de transferencia de calor
Fractura	Tenacidad a la fractura	Fatiga	Fatiga por corrosión Resistencia a la fatiga
Manufactura	Disponibilidad Propiedades de procesado Métodos de unión	Eléctrica	Conductividad Constante dieléctrica Histéresis
		Corrosividad	Corrosión y degradación Oxidación

El proceso completo de la selección de materiales puede ser dividido básicamente en tres pasos:

- I. Determinación de las propiedades críticas a partir de las condiciones y entorno bajo el cual el producto operará.
- II. Revisión de las bases de datos de materiales para obtener candidatos que cumplan con las propiedades críticas del material.
- III. Seleccionar, de los candidatos, el material final considerando sus características y ventajas sobre los demás.

Aunque la selección final del material normalmente se lleva a cabo durante una fase conocida como *diseño de detalle*, parte de la etapa final del diseño, la selección de materiales ocurre en cada paso del proceso. Sin embargo, en la etapa conceptual es recomendable considerar un mayor espectro con la finalidad de inspirar diseños más innovadores.

La literatura muestra una gran cantidad de información para la verificación de valores en las propiedades de materiales. No obstante, es común que dicha información se encuentren en forma de tablas y mostrando valores para materiales específicos y correspondientes a una propiedad en particular. Este proceso puede volverse demasiado lento si se utiliza como fuente primaria para la selección de materiales; por otro lado, existe el riesgo de pasar por alto algunos materiales cuya consideración pudiera ser de importancia.

Dos herramientas útiles que presentan ventajas en la selección de materiales, son los índices de desempeño, que definen la combinación de propiedades de los

materiales y proporcionan información sobre la forma en que puede maximizarse el desempeño de un componente; y las cartas de propiedades de materiales [48].

### 4.1.2 Las cartas de propiedades de los materiales

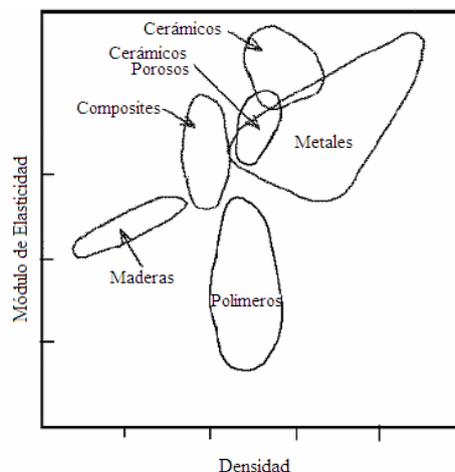
Las propiedades de los materiales determinan el desempeño de los componentes. Sin embargo, rara vez este desempeño depende de una sola propiedad, ya que comúnmente la combinación de propiedades es de mayor importancia que sólo una de ellas. Por ejemplo, puede ser necesario un componente ligero (mínima masa), pero con la capacidad de soportar una carga definida (resistencia). Este caso involucra dos características del material, cuya relación resistencia-densidad es de mayor importancia para el diseño del componente.

Relaciones de este estilo son consideradas en la selección de materiales, lo que sugiere una forma distinta de presentar la información sobre características de los materiales. La idea original de este enfoque pertenece al profesor Michael Ashby [48]. En su trabajo, este investigador presenta de manera gráfica una propiedad contra otra en un espacio que finalmente es ocupado por campos que representan las distintas clases de materiales conocidos.

Las cartas resultantes son útiles en distintas formas, pues condensan gran cantidad de información de una manera compacta y accesible, y revelan correlaciones entre las propiedades del material que son de ayuda en la revisión y estimación de datos. Asimismo, conducen a técnicas de optimización de desempeño, lo cual es de gran importancia en el proceso de selección.

### 4.1.3 Exhibición de las propiedades

Cada propiedad de un material de Ingeniería tiene un intervalo característico de valores. En las cartas de propiedades, estos valores se presentan de manera gráfica para facilitar la selección. Un ejemplo de este tipo de herramientas se ilustra en la Figura 24.



**Figura 24**  
**Ejemplo de Cartas de Propiedades de Materiales.**

En este caso, una propiedad se grafica contra otra propiedad en una escala logarítmica, es decir, densidad vs módulo de elasticidad. La extensión de los ejes es elegida con la finalidad de incluir a todos los materiales, del más ligero al más pesado, y del más suave al más rígido. Puede verse entonces que los datos para una clase dada de materiales aparecen juntos en la carta dentro de un campo bien definido, como se muestra en la figura. Tal campo encierra a todos los miembros de la clase.

Un gran número de propiedades mecánicas y térmicas caracterizan a un material, y determinan su uso en el diseño en Ingeniería (Tabla 9); éstas incluyen densidad, módulo de elasticidad, resistencia, tenacidad, coeficiente de amortiguamiento y conductividad térmica, entre otras. Las cartas muestran información de estas propiedades para distintas clases de materiales, graficando los datos dentro de cada clase para un conjunto representativo de materiales. Los conjuntos se eligen de tal manera que se incluyan los miembros más comunes y mayormente utilizados de cada clase, además de que representen el intervalo completo del comportamiento de la clase. De esta forma, el campo para una clase encierra datos para prácticamente todos los miembros.

Las cartas muestran un intervalo de valores de cada propiedad, que puede variar en magnitud en función de otras características del material. El tratamiento térmico y el trabajo mecánico tienen un efecto significativo en la resistencia de fluencia, amortiguamiento y tenacidad de los metales, mientras que la cristalinidad y grado de *cross-linking* lo tienen en el módulo de elasticidad de los polímeros. Estas propiedades sensibles a la estructura aparecen en las cartas como burbujas alargadas dentro de los campos, conteniendo cada burbuja un intervalo típico para el valor de la propiedad para un solo material. De manera extensiva, los campos incluyen varias burbujas para una clase de materiales.

#### 4.1.4 Índices de desempeño

En aplicaciones de la Ingeniería, cada componente se diseña para realizar una o más funciones. Por ejemplo, soportar flexión, contener una presión o transmitir calor. Para su diseño, el diseñador tiene un objetivo para la aplicación, para su manufactura, costo, etc. como el de lograr un componente ligero, del menor costo posible, que proporcione la máxima seguridad en su desempeño, entre otros de similar importancia. Sin embargo, estos objetivos se alcanzan con ciertas restricciones, como que el componente debe resistir las cargas dadas sin falla, que ciertas dimensiones sean fijas, que éste pueda funcionar dentro de un intervalo definido de temperatura y un ambiente dado, etc. La función, el objetivo y las restricciones del componente definen entonces las condiciones de frontera para la selección de un material.

A partir de estas condiciones se identifican los límites de las propiedades y los índices de desempeño que son la clave para optimizar la selección. Estos límites son fronteras dentro de las cuales deben encontrarse ciertas propiedades si el material va a ser considerado como un candidato para la selección final.

Los índices de desempeño se refieren a agrupaciones de las propiedades de los materiales, cuya particularidad es que si son maximizados, maximizan un aspecto del desempeño del componente. Dos de ellos son la rigidez específica y la resistencia específica [48]. La rigidez específica se expresa como  $E/\rho$ , donde  $E$  representa el módulo de Young y  $\rho$  la densidad. Materiales con valores excepcionalmente altos de  $E/\rho$  son excelentes candidatos para un elemento que soporte tensión, ligero y rígido. Por otro lado, valores extremos de la resistencia específica, que se expresa como  $\sigma_y/\rho$ , con  $\sigma_y$  indicando el esfuerzo de fluencia, son buenos candidatos para el diseño de un elemento ligero y resistente.

Como los ejemplificados anteriormente, existen diversos índices de ese tipo, cada uno caracterizando una combinación particular de función, objetivo y restricción. Su derivación se desprende de expresiones del objetivo, es decir, una función objetivo expresada como una ecuación matemática que describa la cantidad a ser maximizada o minimizada. Esta función contiene variables libres, parámetros del problema que el diseñador aplica en función de su criterio y antecedentes del problema, respetando el cumplimiento de las restricciones impuestas.

#### **4.1.5 Derivación de los índices de desempeño**

El diseño de un componente mecánico se especifica mediante tres grupos de variables: los requerimientos funcionales, **F**, que representan la necesidad de soportar cargas, transmitir calor, etc.; las especificaciones en geometría, **G**, como forma y dimensiones, y alguna combinación **M**, que se refiere a las propiedades  $p$  del material del cual se constituye el componente. El desempeño **P** del componente puede ser descrito por una ecuación de la forma siguiente:

$$\mathbf{P}=f(\mathbf{F},\mathbf{G},p) \quad (7)$$

En esta expresión, **P** es la cantidad que se busca maximizar (la masa del componente, su volumen, su costo, etc.) y  $f$  significa “una función de”. El diseño óptimo puede considerarse como la selección del material y geometría que maximiza **P**. Esta optimización está, además, sujeta a restricciones, algunas de ellas impuestas por las propiedades del material.

Los tres grupos de parámetros en la ecuación anterior (ec. 7) se dice que son separables cuando la ecuación puede ser escrita como:

$$\mathbf{P}=f_1(\mathbf{F}) f_2(\mathbf{G}) f_3(p) \quad (8)$$

Donde  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  son funciones. Cuando los grupos son separables, como usualmente lo son, la elección óptima del material se vuelve independiente de los detalles del diseño: es lo mismo para todas las geometrías **G** y todos los valores de los requerimientos funcionales **F**. Entonces, el óptimo material puede ser identificado sin resolver el problema completo de diseño [47, 48]. Esto permite una enorme simplificación, a decir, el desempeño de **P** es maximizado si se maximiza  $\mathbf{M}=f_3(p)$ , el cual se conoce como “índice de desempeño”.

Los pasos generales para la derivación de un índice de desempeño, que constituyen la base para un método de selección óptima de material, se listan a continuación [48]:

*Identificación de la función primaria del componente para el cual un material es buscado.* Una viga soporta momentos de flexión; un resorte almacena energía elástica, un intercambiador de calor transmite calor, etc.

*Escribir una ecuación para el objetivo, llamada la función objetivo.* El objetivo es la primera y más importante cantidad a ser maximizada o minimizada; comúnmente es peso o costo, aunque puede ser cualquier otra propiedad, dependiendo de la aplicación.

*Identificación de las necesidades o restricciones.* Son requerimientos de diseño que deben ser cumplidos y los cuales limitan el proceso de optimización.

*Eliminar las variables libres en la función objetivo mediante el uso de restricciones.* Agrupar las propiedades de los materiales para obtener el "índice de desempeño", que maximiza o minimiza el valor de la función objetivo.

Cada combinación de una función, un objetivo y una restricción, conduce a un índice de desempeño que caracteriza la combinación. Tomando en cuenta que existe un gran número de estas combinaciones, se han derivado ya diversos índices de desempeño de acuerdo con las características del elemento. La Tabla 10 muestra algunos de ellos.

**Tabla 10**  
**Algunos índices de desempeño para selección de materiales [48].**

Geometría y Condición de carga	Criterio de peso mínimo basado en la rigidez	Criterio de peso mínimo basado en la resistencia
Barra cilíndrica bajo tensión o compresión	$\rho/E$	$\rho/\sigma$
Barra cilíndrica en flexión	$\rho/E^{1/2}$	$\rho/\sigma^{2/3}$
Barra cilíndrica en torsión	$\rho/G^{1/2}$	$\rho/\tau^{2/3}$
Eje de pared delgada en torsión	$\rho/G$	$\rho/\tau$

## 4.2 Selección de materiales para rompeolas alternativos

### 4.2.1 Identificación de las propiedades críticas

Acorde con el tema del presente desarrollo sobre elementos de atenuación de oleaje, el primer paso en el proceso de la selección de los materiales lo constituye la identificación de las propiedades principales que deben ser consideradas para la construcción de rompeolas. Como información de referencia, es necesario conocer el ambiente sobre el cual dicho componente será utilizado, así como las cargas y restricciones a las cuales estará expuesto.

En función del comportamiento dinámico de los vehículos se ha determinado que la masa y su distribución juegan un papel sumamente importante en las características de estabilidad. Por esta razón, se concluye que una de las características principales del material para la construcción de los rompeolas debe ser la menor masa posible, de forma tal que no contribuya de manera importante con el aumento de la masa del tanque y global del vehículo. Esta consideración permite establecer a la densidad una de las propiedades críticas en la selección.

En contraparte, debido a que el componente será expuesto a cargas mecánicas, es necesario que el componente posea la resistencia suficiente para soportarlas. De aquí, en conjunto con la baja densidad, se considera la resistencia mecánica como otra de las propiedades importantes para la selección de materiales.

Considerando estas dos propiedades, es importante que el material posea una alta resistencia en conjunto con una muy baja densidad. Una de las expresiones que relaciona estas dos propiedades es la resistencia específica, la cual se define como el cociente de la resistencia entre la densidad del material. De manera ilustrativa, la tabla siguiente muestra la resistencia específica de algunos de los materiales.

**Tabla 11**  
**Resistencia específica de algunos materiales [46].**

Material	Resistencia a la tensión [MPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistencia específica [MNm/kg]
Aluminio	572,3	2687,4	0,213
Berilio	379,2	1856,2	0,204
Plomo	68,9	11359,0	0,006
Magnesio	379,2	1745,4	0,217
Poliestireno	43,9	1050,0	0,042
Nylon 12	39,2	1040,0	0,038
Madera (Pino)	2,41	360,0	0,007

De acuerdo con esta tabla, de los valores de resistencia específica se observa que uno de los materiales que pudieran ser útiles en la construcción de los rompeolas es el magnesio, seguido del aluminio y posteriormente el berilio. Sin embargo, se ha observado que algunas veces una relación directa como la que considera la resistencia específica no proporciona la mejor orientación en el proceso de la selección de materiales. Para esto, una herramienta útil la constituyen los índices de desempeño. Por otro lado, además de que esta tabla considera sólo algunos materiales, existen aspectos adicionales que deben ser tomados en cuenta para una buena selección de materiales, incluyendo otras clases de materiales y la satisfacción de requisitos adicionales.

Debido a que el elemento deberá trabajar en contacto con elementos considerados como agresivos, caso de combustibles como gasolinas y diesel, el material seleccionado debe presentar una resistencia aceptable a la degradación por la exposición al contacto con los mismos.

Finalmente, aunque no de menor importancia, se considera el costo del material. Para favorecer la factibilidad de empleo del material seleccionado, su costo debe mantenerse tan bajo como sea posible y sin comprometer las propiedades ya mencionadas.

Consecuentemente, este estudio toma de base propiedades como la densidad, la resistencia mecánica a tensión, la compatibilidad química y el costo.

Habiendo identificado las propiedades de mayor importancia, la selección de materiales prosigue con la ayuda de las cartas de propiedades que conduzcan a la obtención de un conjunto de candidatos para la construcción de rompeolas. Aunque es necesario partir de información sobre la relación resistencia-densidad de los distintos materiales, específicamente de la densidad contra el límite elástico, además de una simple aproximación poco puede obtenerse considerando únicamente esa relación. En este sentido, el índice de desempeño proporciona mayor ventaja para esta aplicación.

### 4.2.2 Derivación del índice de desempeño

En la derivación del índice de desempeño se supone que el rompeolas funciona como una placa con carga uniformemente distribuida sobre su superficie, de donde se establece la siguiente información:

---

**Función:** Placa soportando cargas transversales

**Objetivo:** Minimizar la masa

**Restricciones:** Geometría definida, espesor libre. Soportar cargas transversales sin falla. Suficiente resistencia mecánica a tensión

---

Bajo estas condiciones, el esfuerzo de tensión en una placa con carga distribuida uniformemente y fija en todos sus extremos, viene dado por una expresión de la forma [49]:

$$\sigma = \frac{CW}{t^2} \quad (9)$$

Donde:

$\sigma$ : esfuerzo de tensión en la placa

$C$ : constante dependiente de la geometría, forma de carga y modo de fijación de la placa

$W$ : carga

$t$ : espesor de la placa

Por otro lado, la masa de la placa se estima de la expresión siguiente:

$$m = At\rho \quad (10)$$

Donde:

$m$  : masa

$A$  : área

$\rho$  : densidad

Puesto que el objetivo es el de minimizar la masa, puede lograrse reduciendo  $t$ . Sin embargo, como restricción en este caso,  $t$  debe ser lo suficientemente grande como para soportar las cargas sin que se presente la falla del elemento. Por tanto, combinando estas consideraciones, se obtiene:

$$\frac{CW}{t^2} \leq \sigma_f \quad (11)$$

Siendo  $\sigma_f$  el esfuerzo de falla del material.

Despejando  $t$  de la ec. (10) y sustituyendo la expresión resultante en la desigualdad previamente mostrada, ec. (11), se obtiene:

$$\frac{A^2 \rho^2 CW}{m^2} \leq \sigma_f \quad (12)$$

Despejando  $m$ :

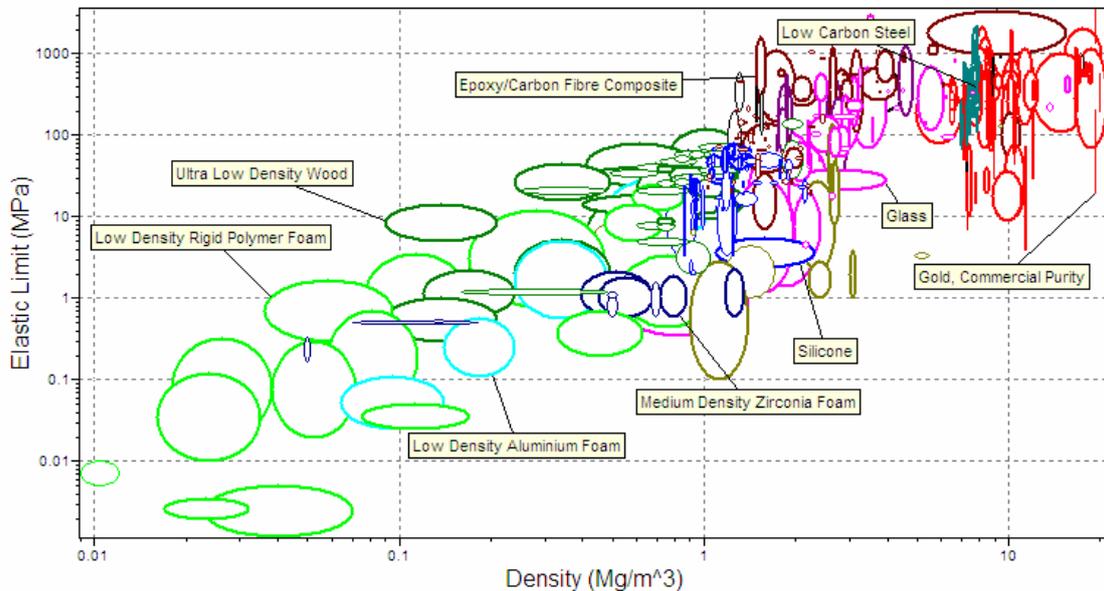
$$m \geq (CW)^{\frac{1}{2}} \left( A \left( \frac{\rho}{\sigma_f^{\frac{1}{2}}} \right) \right) \quad (13)$$

En esta expresión pueden identificarse tres grupos. La expresión dentro del primer paréntesis corresponde a las características de funcionalidad, el segundo a las de geometría y el tercero relacionado con las propiedades del material. Aunque las propiedades del material se presentan como densidad dividida por resistencia, en virtud de maximizar el índice de desempeño **M**, éste se expresa como:

$$M = \frac{\sigma_f^{\frac{1}{2}}}{\rho} \quad (14)$$

Continuando con el proceso de la selección y tomando en cuenta las propiedades que constituyen el índice de desempeño, se obtiene la carta de propiedades que proporciona información sobre el límite elástico y la densidad. La Figura 25 muestra esa carta, en la que puede apreciarse que los distintos colores indican diferentes clases de materiales, como por ejemplo, el azul se usa para polímeros;

el magenta, para cerámicos; el verde lima, para espumas (foams) de polímeros; el azul aqua, para espumas metálicas; el azul marino, para espumas cerámicas; el verde oscuro, para materiales naturales; el café, para materiales compuestos; el rojo, para aleaciones no ferrosas, de metales preciosos y de refractarios; el verde azulado, para aleaciones ferrosas.



**Figura 25**  
**Carta densidad-límite elástico [47].**

Debido a que no se tiene una carga definida y que el acero ha sido utilizado sin problemas aparentes de resistencia mecánica, este material será utilizado como referencia para la selección de un material alternativo. Además, como la información se grafica en la carta en forma logarítmica, para facilitar la interpretación se debe entonces expresar el índice de desempeño de la misma manera. Para este proceso se toma de base la siguiente expresión de la línea recta, representando genéricamente la pendiente un índice de desempeño constante:

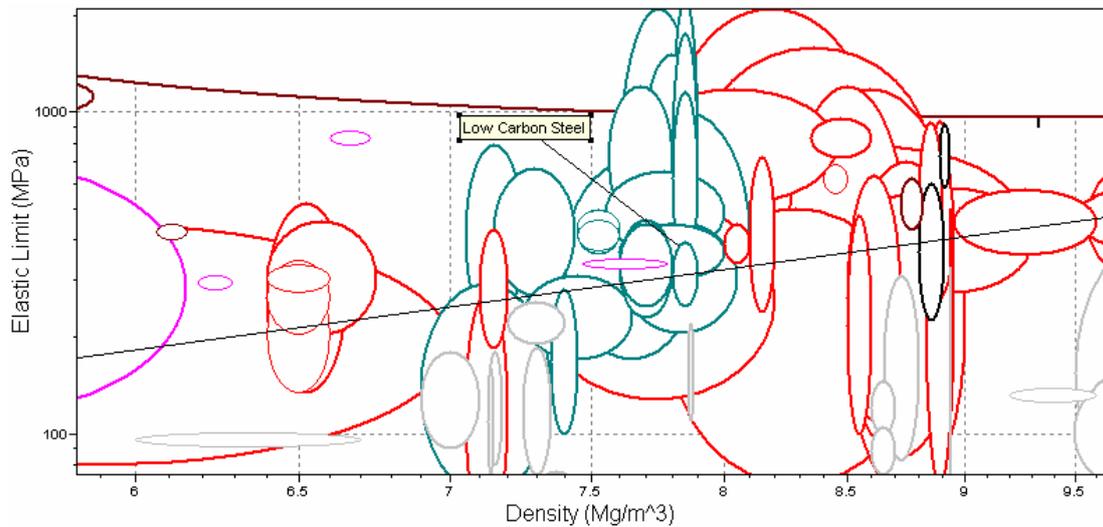
$$y = mx + b \quad (15)$$

La variable  $y$  corresponde al logaritmo de la resistencia  $\sigma$  y  $x$  es al logaritmo de la densidad  $\rho$ . Partiendo de la expresión del índice de desempeño (ec. 14), y aplicando logaritmos a ambos miembros de dicha expresión, finalmente se obtiene:

$$\log \sigma = 2 \log \rho + 2 \log M \quad (16)$$

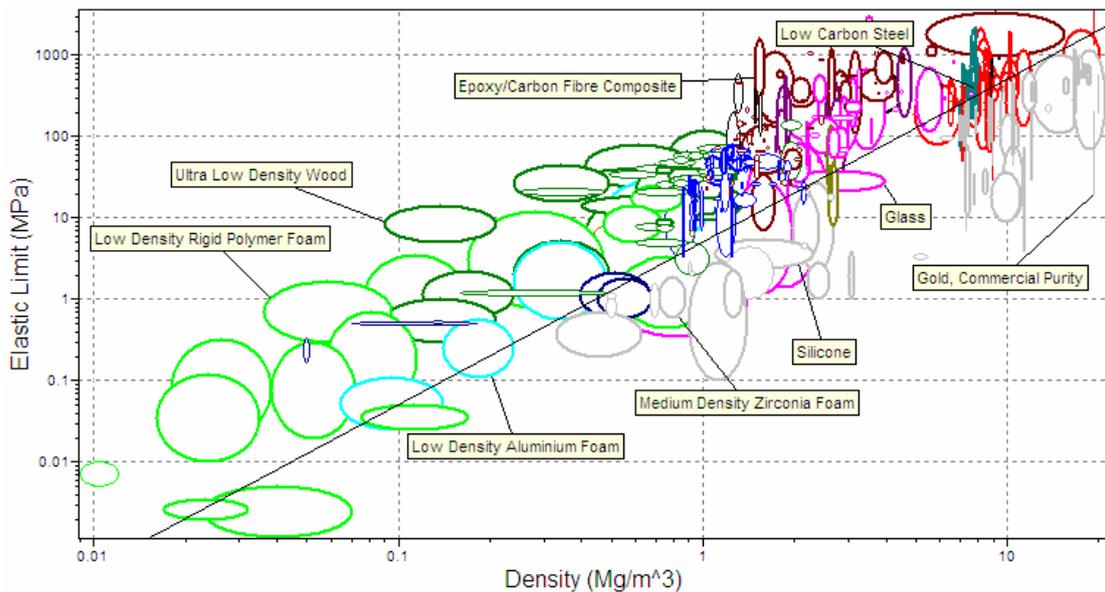
De acuerdo con esta expresión, la pendiente de la línea que corresponde a un valor constante de este índice de desempeño, en una gráfica de este tipo, es 2. Trazando una línea con tal pendiente que cruce por el acero de referencia, es decir, el acero de bajo carbono AISI 1010, los materiales en la línea corresponden

a aquellos con un desempeño similar, tomando en cuenta sólo las dos propiedades mencionadas. Como se presentan en la gráfica, los materiales que se encuentran por arriba de dicha línea, presentan un mejor desempeño de esas cualidades. La Figura 26 muestra una ampliación de la carta mencionada para apreciar la ubicación del acero de referencia y la colocación de la línea de desempeño constante.



**Figura 26**  
**Ilustración de la ubicación del acero y la línea de desempeño.**

En la Figura 27 se muestra una vista completa de la carta anterior con la línea de desempeño.



**Figura 27**  
**Identificación de materiales alternativos.**

En esta figura, los materiales coloreados de gris son aquellos materiales que pueden ser descartados debido a que presentan un desempeño menor al seleccionado.

Bajo estas consideraciones, los materiales que se encuentran sobre la línea del índice de desempeño constituyen un conjunto de materiales que pueden ser inicialmente considerados para la construcción de los rompeolas. Sin embargo, del conjunto obtenido es posible extraer una nueva selección al considerar dos condiciones adicionales del material, que son la compatibilidad con el ambiente de trabajo y el costo.

En este proceso se intentó aplicar un programa computacional conformado por una base de datos de las propiedades del material. El programa utilizado para la selección fue de tipo comercial, estando disponible únicamente una versión de evaluación que, desafortunadamente, no tenía habilitadas todas sus funciones, entre las que se encuentra la resistencia de los materiales hacia ciertos ambientes. Por tanto, el siguiente criterio que se tomó para continuar con el proceso de la selección de materiales fue el costo, posponiendo las consideraciones de la compatibilidad química del material con el ambiente de trabajo.

Tomando en cuenta que el costo total de la pieza (en forma de placa) puede ser estimado a partir de la cantidad de masa utilizada, éste puede ser obtenido mediante:

$$\text{Costo total} = C_m m \quad (17)$$

Donde

$C_m$ : costo por unidad de masa del material

$m$ : masa

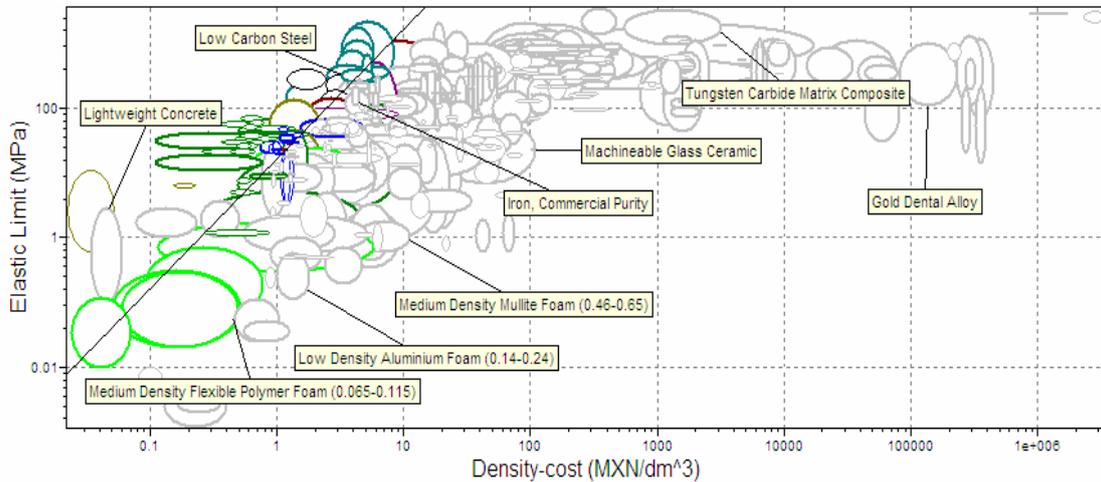
De esta condición, puede obtenerse un nuevo índice de desempeño. Considerando la expresión de la cantidad de masa necesaria (ec. 13), se tiene que el costo total es:

$$C_m m \geq C_m \left[ (CW)^{\frac{1}{2}} (A) \left( \frac{\rho}{\sigma_f^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \quad (18)$$

Similar al proceso de obtención del índice de desempeño anterior, para encontrar un costo mínimo es necesario maximizar el índice de desempeño que se muestra a continuación:

$$M = \frac{\sigma^{1/2}}{\rho C_m} \quad (19)$$

Apoyándose en este índice, se obtiene otro conjunto de materiales, tomando nuevamente como referencia al acero de bajo carbono. Esto se muestra en la Figura 28.



**Figura 28**  
**Identificación de materiales basado en el costo.**

De manera similar al proceso seguido para la obtención del primer conjunto de materiales, los que aparecen de color gris en la Figura 28, pueden ser descartados de acuerdo con este nuevo índice de desempeño.

### 4.2.3 Materiales alternos

De la intersección de los dos conjuntos obtenidos hasta el momento, se tiene un grupo de materiales que presentan bajo costo y densidad, mostrado en la Tabla 12. Por tal motivo, de este nuevo conjunto se considera el siguiente aspecto importante, la compatibilidad con el ambiente de trabajo.

**Tabla 12**  
**Conjunto de materiales en la selección.**

<ul style="list-style-type: none"> <li> Acrylic</li> <li> Aerated Concrete</li> <li> Bamboo</li> <li> Bamboo (Longitudinal)</li> <li> Cotton</li> <li> Epoxy/Glass Fibre Composite</li> <li> Ethylene Propylene Terpolymer (EPDM)</li> <li> Ethylene-Propylene (EPM)</li> <li> Fibreboard, extra hard, parallel to board</li> <li> Fibreboard, extra hard, perpendicular to board</li> <li> Fibreboard, hard, parallel to board</li> <li> Fibreboard, hard, perpendicular to board</li> <li> Fibreboard, medium hard, parallel to board</li> <li> Fibreboard, medium hard, perpendicular to board</li> <li> Flax</li> <li> Grey (Flake graphite) Cast Iron</li> <li> Hardboard (Standard), parallel to board</li> <li> Hardboard (Standard), perpendicular to board</li> <li> Hardboard (Tempered), parallel to board</li> <li> Hardboard (Tempered), perpendicular to board</li> <li> Hemp</li> <li> High Carbon Steel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Low Density Wood (Transverse) (0.22-0.45)</li> <li> Magnesium, Commercial Purity</li> <li> Marble</li> <li> Medium Carbon Steel</li> <li> Medium Density Fibreboard, parallel to board</li> <li> Medium Density Fibreboard, perpendicular to board</li> <li> Medium Density Flexible Polymer Foam (0.065-0.115)</li> <li> Medium Density Wood (Longitudinal) (0.45-0.85)</li> <li> Medium Density Wood (Transverse) (0.45-0.85)</li> <li> Natural Rubber (NR), 50% HAF black</li> <li> Natural Rubber (NR), unfilled</li> <li> Nickel-Chromium White Cast Iron</li> <li> Nodular (spheroidal, ductile) Cast Iron</li> <li> Palm (0.35)</li> <li> Palm (0.50)</li> <li> Palm (0.83)</li> <li> Particleboard (Longitudinal)</li> <li> Particleboard (Transverse)</li> <li> Pearlitic Malleable Cast Iron</li> <li> Phenolic Matrix Composite</li> <li> Plywood (Longitudinal)</li> <li> Plywood (Transverse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> High Chromium White Cast Iron</li> <li> High Density Polyethylene</li> <li> High Density Wood (Longitudinal) (0.85-1.43)</li> <li> Ice (H2O)</li> <li> Insulation Board, parallel to board</li> <li> Isoprene (IR) - unfilled</li> <li> Limestone</li> <li> Low Alloy Steel</li> <li> Low Alloy White Cast Iron</li> <li> Low Carbon Steel</li> <li> Low Density Flexible Polymer Foam (0.036-0.065)</li> <li> Low Density Rigid Polymer Foam (0.037-0.087)</li> <li> Low Density Wood (Longitudinal) (0.22-0.45)</li> <li> Polypropylene</li> <li> Polypropylene (PP) - 20% CaCO3</li> <li> Polypropylene (PP) - 20% Talc</li> <li> Polystyrene</li> <li> Polyvinylchloride (PVC) - 0.03 (Plasticised)</li> <li> Polyvinylchloride (UPVC) - Rigid</li> <li> Polyvinylchloride (UPVC) - Rigid High Impact</li> <li> Structural Polymer Foam (0.58-0.86)</li> <li> Very Low Density Flexible Polymer Foam (0.016-0.036)</li> <li> Very Low Density Rigid Polymer Foam (0.018-0.037)</li> <li> Whiteheart Malleable Cast Iron</li> <li> Wool</li> <li> Wrought Aluminium Alloy</li> </ul>
--	---	---

Los materiales aquí listados han sido seleccionados debido a que presentan, hasta este punto, un desempeño igual o superior al mostrado por el acero de bajo carbono, actual material de construcción de los rompeolas. Sin embargo, un aspecto importante para la selección de un material alternativo es la capacidad del mismo para retener sus propiedades al ser expuesto al ambiente de trabajo. Por tal motivo, es de suma importancia que en la selección final se considere la compatibilidad entre el material de construcción con el material de transporte en los autotanques.

Debido a que el programa computacional utilizado en la mayor parte del proceso de selección no permitió considerar la compatibilidad entre materiales, se optó por continuar con el proceso desde otra perspectiva.

En este sentido, se realizó una búsqueda de información sobre materiales alternos al acero, utilizados para la fabricación de componentes en contacto con gasolinas y diesel. En tal proceso se encontró que algunos materiales poliméricos como el polietileno de alta densidad y el poliuretano [30, 50, 51], ya han sido utilizados para este propósito, principalmente en la industria automotriz. Con base en esta información, estos dos materiales fueron propuestos para conformar un nuevo grupo de candidatos para la construcción de rompeolas, teniendo como principal característica la compatibilidad con los combustibles mencionados.

De los dos últimos grupos de materiales, resalta el polietileno de alta densidad (HDPE) como principal candidato para sustituir al acero en la construcción de rompeolas.

Una de las ventajas que ofrece el uso de polímeros en la construcción de componentes automotrices, es su relativamente baja densidad [30]. Este hecho resulta también ventajoso al utilizar el HDPE en la fabricación de rompeolas, sin embargo, para evaluar la magnitud de tales ventajas, es necesario tomar en cuenta la cantidad de material requerido para que el rompeolas posea la suficiente resistencia para soportar las cargas del oleaje.

### **Estimación de la cantidad de masa**

Debido a que no se cuenta con información sobre las cargas que soporta cada rompeolas dentro del tanque, que ayudaría a estimar el espesor necesario para su construcción, se toma de referencia las dimensiones de los rompeolas actuales, que han mostrado suficiencia para resistir las cargas derivadas del movimiento del fluido. Con ello, se puede obtener una aproximación del espesor necesario de rompeolas con materiales alternativos.

Para los rompeolas de placa de acero, se aplica la expresión [49]:

$$\sigma = \frac{0,31W}{t^2} \quad (20)$$

Siendo:

$\sigma$ : esfuerzo de tensión

$W$ : carga uniformemente distribuida.

$t$ : espesor de la placa

Esta expresión es útil para el cálculo del esfuerzo de tensión en la placa. Tomando en cuenta la resistencia de fluencia del acero AISI 1010, la cual se ubica en los 180MPa [52], la carga máxima uniformemente distribuida que puede resistir la placa de 3,4 mm de espesor es 6712 N. Con esta fuerza como referencia, considerando el esfuerzo de fluencia del polietileno de alta densidad (HDPE) en 19 MPa [52], el espesor necesario para rompeolas de este material es de aproximadamente 10,4mm.

Considerando la construcción de rompeolas de estos dos materiales, en el caso de rompeolas de acero del tipo rb con espesor de 3,4 mm, cada uno contribuye con 23 kg, por lo que el arreglo de 5 elementos contribuye con 115 kg. Con respecto a los rompeolas actuales tipo r, lo anterior constituye una disminución de la masa del 77%.

Para el caso del uso de HDPE, la cantidad de masa necesaria para la construcción de un elemento es de 8,6 kg para el tipo rb, totalizando 42,9 kg para

el uso de 5 rompeolas. Este peso constituye menos del 10% de los rompeolas actuales.

Aunque con la modificación de la geometría de los rompeolas se obtienen ventajas sustanciales en cuanto a la adición de masa al tonel, mayores ventajas en este sentido se logran por la utilización de un material alternativo, como es el caso del HDPE, para la construcción de los rompeolas.

Por otro lado, debido a que la fórmula considerada para la realización de estos cálculos (ec. 20), es recomendada para materiales como el acero, aluminio, etc., materiales cuyo módulo de Poisson es relativamente cercano a 0,3, para una mayor refinación se sugiere se realicen análisis mecánicos posteriores (no en el alcance de este trabajo). Estos pueden aplicar la técnica de elementos finitos para establecer el grado de esfuerzo al que sería sometido el elemento con una carga similar, tomando como referencia al acero actualmente utilizado.

Finalmente, considerando la rigidez que confieren al tonel los rompeolas actuales, se propone la utilización de anillos de acero al interior del tonel, sobre los cuales sean montados los rompeolas del material alternativo.



## Conclusiones y recomendaciones

---

En la literatura se reporta que el oleaje producido en toneles llenados parcialmente, puede alterar significativamente el desempeño dinámico de los autotanques durante su tránsito por carretera, comprometiendo el control direccional del vehículo. El uso de rompeolas transversales en autotanques, tiene la finalidad de disminuir el efecto del movimiento longitudinal del fluido sobre el comportamiento dinámico del vehículo. Aunque la efectividad de estos dispositivos ha sido comprobada, no se cuenta con información técnica que conduzca a un método de selección del número y forma de rompeolas, que atenúen el oleaje de manera efectiva. El número de rompeolas se define en la actualidad de manera arbitraria, cuya forma es esencialmente la misma en todos los autotanques.

En términos generales, la ubicación del centro de gravedad afecta las características de estabilidad de los vehículos. Para mejorar esta estabilidad, es necesario mantener el centro de gravedad tan bajo como sea posible. El incremento de masa en las partes altas de autotanques por el uso de elementos accesorios, como es el caso de los rompeolas en el tonel, contribuye a la elevación del centro de gravedad, afectando negativamente la estabilidad del vehículo. Para reducir este efecto, materiales y geometrías alternativas de rompeolas pueden ser utilizados, sin comprometer con ello su función de supresores de oleaje.

Debido a que se ha encontrado que los niveles inferiores de los volúmenes de líquido en autotanques tienen una menor participación en el oleaje, se puede sugerir el uso de rompeolas que actúen en la región superior del líquido contenido. Rompeolas de sección parcial, acordes con la masa de mayor movimiento, resultan efectivos en la reducción y atenuación del oleaje. Estos rompeolas pueden ser fabricados con materiales más ligeros, sin afectar su desempeño mecánico. Sin embargo, a fin de evitar problemas de degradación en los rompeolas y posible contaminación del líquido transportado, es necesario que exista compatibilidad química entre el material de los rompeolas y el material de transporte.

Aunque el papel principal de los rompeolas es la supresión del oleaje dentro del contenedor, también actúan como elementos que proporcionan rigidez adicional al tonel. Es importante, por tanto, considerar este hecho en diseños alternativos o de modificación de la geometría de los rompeolas.

De acuerdo con los resultados de los experimentos descritos en esta tesis, el nivel de atenuación o de supresión de oleaje no es directamente proporcional al número de rompeolas empleados. Esto es, se observó que el incremento del número de rompeolas no siempre presenta un efecto positivo en cuanto a la atenuación de oleaje. Adicionalmente, el uso de un mayor número de elementos constituye una mayor cantidad de la masa adicionada al contenedor, por lo que es importante reducir al mínimo el número de elementos sin sacrificar las ventajas obtenidas en

la disminución del movimiento del fluido. Por otro lado, altos niveles de llenado producen menos oleaje y, con ello, menor fuerza. Estos resultados respaldan el transporte de líquidos con altos niveles de llenado.

Rompeolas comunicados (como el ra o el rb) permiten que las “cámaras” formadas entre uno y otro rompeolas funcionen como amortiguadores del oleaje a niveles parciales de llenado. El comportamiento del fluido observado durante la ejecución de pruebas de impacto longitudinal moderado, permite suponer que la atenuación del oleaje dentro del contenedor no se debe sólo a la utilización de rompeolas, sino que influye también la interacción e intercambio de fluido entre distintas secciones del tonel.

El uso de materiales alternativos al acero, como el polietileno de alta densidad (HDPE), ofrece ventajas adicionales en términos de disminución de la masa accesoria y costos de fabricación para resistencias mecánicas equivalentes. Además, este material presenta mejores propiedades anticorrosivas y de compatibilidad con los combustibles líquidos como diesel y gasolinas.

Las cartas de propiedades de los materiales, en conjunto con los índices de desempeño, constituyen una herramienta de gran relevancia en el proceso de selección de materiales. Estos elementos simplifican el trabajo considerablemente, al presentar información sobre propiedades de una amplia gama de materiales en una forma gráfica.

Aunque no se realizaron estudios para evaluar rompeolas para disminuir el oleaje en la dirección transversal al tonel, los resultados obtenidos permiten suponer que el material alterno aquí propuesto, puede ser utilizado también para la construcción de tales elementos. Esto se deriva de que las condiciones generales son similares, difiriendo sólo en la magnitud de la fuerza de oleaje transversal, la cual se supone menor a la longitudinal.

En este estudio sólo se consideraron tres tipos distintos de geometrías de rompeolas. El dispositivo creado para la evaluación de éstos puede ser utilizado para probar nuevas configuraciones, no sólo de rompeolas transversales, sino de rompeolas longitudinales u otras modificaciones, combinaciones o arreglos geométricos y de rompeolas. En este sentido, es importante enfatizar la relevancia del protocolo desarrollado para la ejecución de las pruebas mostradas en este trabajo, basado en el modelado a escala.

## **Recomendaciones**

Tomando en consideración la experiencia obtenida con el desarrollo del actual trabajo, se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones:

Evaluar el efecto del oleaje transversal. Esto, debido a que la estabilidad lateral es importante sobre la propensión a la volcadura de los vehículos autotanque. El prototipo de prueba empleado puede ser utilizado para probar rompeolas longitudinales para atenuar el oleaje transversal.

Detallar un estudio relacionado con el escalamiento del fenómeno de oleaje, de tal manera que se obtenga una relación más directa de los resultados con el caso real. Este tipo de estudios puede complementarse con análisis teórico-numéricos, como métodos de elementos finitos, para estimar la carga sobre cada uno de los rompeolas debido al movimiento del fluido.

Debido a que en este estudio no se consideraron las características de resistencia a la fatiga ni la rigidez de los rompeolas, se sugiere la incorporación de estos aspectos en estudios posteriores.



## Referencias

---

1. De la Vega Navarro, A. (2003). "La industria petrolera mexicana en el marco de las tendencias globales del cambio institucional, organizacional y tecnológico", Coloquio internacional "Energía, Reformas institucionales y desarrollo en América Latina", Universidad Autónoma de México – Université PMF de Grenoble, Francia, Noviembre 5-7, Cd. de México.
2. Instituto Mexicano del Transporte. (2000). "Manual estadístico del transporte en México". Versión en línea. Fecha de consulta: Diciembre 2006.
3. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995. (1997). "Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal". Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicada en el diario oficial de la Federación el 7 de enero de 1997.
4. Organización Internacional de Metrología Legal. (1989). Recomendación OIML R-80 "Autotancques y Carrotancques" Documento OIML1BB20A2004A.
5. Swenson, K. (2000). "Anti-surge Safety Tank Baffle System Reduces Sloshing, Stress, Improves Vehicle Handling". IMSA Journal. Vol. 38, No. 4. pp. 60-61.
6. Rakheja, S., Stiharu, I., Kang, X., Romero, J. A. (2002). "Influence of tank cross-section and road adhesion on dynamic response of partly-filled tank trucks under braking-in-a-turn". International Journal of Heavy Vehicle Systems Vol. 9, No. 3 pp. 223-240
7. Fabela Gallegos, M. J.; Romero Navarrete, J. A.; Vázquez Vega, D.; Martínez Madrid, M.; Hernández Jiménez, J. R.; Orozco Orozco, P. R.; Favela Gallegos, C. A.; Flores Centeno, O.; Ramírez Valencia, A.; Hernández Pérez, J.; Hildebrand, R. L.; Ramírez Cano, O.; Fortanell Romero, J.; Pereira Fonseca, J.; Lozano Guzmán, A.; Muciño, V. H.; Rakheja, S.; Castaño Meneses, V. M.; Rodríguez Talavera, R. (2003). "Análisis y evaluación del comportamiento dinámico de vehículos autotanque al servicio de PEMEX Refinación" Informe final IF-EE 01/03 del estudio ET-79-01 (EE 01/03). 14 de noviembre de 2003. Coordinación de Equipamiento para el Transporte, Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
8. University of Michigan Transportation Research Institute. (2000). "Rollover of Heavy Commercial Vehicles". Research Review. October–December, Vol. 31, No. 4.
9. Schaefer, G., Corrigan, P., Lescaill, D., Lechner, D. (2001). "Sécurité des Poids Lourds Avec Ballotement del Liquide". SIA Actes du Congrès de Dynamique du Véhicule- CENTRALE LYON.

10. Romero, J. A., Hildebrand, R., Martínez, M., Ramírez, O. y Fortanell, J. M. (2005). "Natural sloshing frequencies of liquid cargo in road tankers", *Int. J. of Heavy Vehicle Systems*, Vol. 12, No. 2, pp 121-138.
11. Romero, J. A., Ramírez, O., Fortanell, J.M., Martínez, M., y Lozano, A. (2006). "Analysis of lateral sloshing forces within road containers with high fill levels" *Journal of Automobile Engineering*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Volume 220, Number 3, 2006, pp. 303-312(10).
12. Bhattacharyya, S. K. (2006). "Suppression of liquid sloshing using baffles", *International Congress on Computational mechanics and simulation (ICCMS06)*, Assam, India, Diciembre 8-10.
13. National Aeronautics and Space Administration. (1969). "Slosh Suppression" NASA SP-8031.
14. Nickkawde, Chetan; Harish, P.M.; Ananthkrishnan, N. (2004). "Stability analysis of a multibody system model for coupled slosh-vehicle dynamics". *Journal of Sound and Vibration* 275, pp. 1069-1083.
15. Yalla, Swaroop Krishna. (2001). "Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental Validation". Dissertation. Department of Civil Engineering and Geological Sciences. Notre Dame, Indiana.
16. Mantriota, G. (2003). "Directional stability of articulated tank vehicles: A simplified model". *Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 10, Nos. 1/2.
17. Dodge, Franklin T. (2000). "The New Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers". Southwest Research Institute. San Antonio, Texas.
18. Abramson, H.N. (1966). "The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers". NASA SP-106.
19. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-033-SCT-2-2000. "Transporte terrestre-Límites máximos de velocidad para los vehículos de carga, pasaje y turismo que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal". Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicada en el diario oficial de la Federación el 16 de febrero de 2001.
20. Vázquez Vega, David, Fabela Gallegos, Manuel de Jesús, Martínez Madrid, Miguel. (2004). "Revisión Documental sobre la Evaluación del Comportamiento Dinámico de Vehículos Pesados" *Publicación Técnica No. 259*. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
21. El-Gindy, M. (1995). "An Overview of Performance Measures for Heavy Commercial Vehicles in North America". *International Journal of Vehicle Design*, Vol 16, Nos. 4/5, pp. 441-463.

- 
22. TRAILER/BODY BUILDERS STAFF. (2000). "TMC Explores Ways to Prevent Rollovers". [http://trailer-bodybuilders.com/mag/trucks\\_tmc\\_explores\\_ways/](http://trailer-bodybuilders.com/mag/trucks_tmc_explores_ways/). Fecha de consulta: Diciembre de 2006.
  23. [http://www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/ aeeum/2005/aeeum2005\\_archivo\\_3.pdf](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/ aeeum/2005/aeeum2005_archivo_3.pdf). Fecha de consulta: Abril de 2006.
  24. Rakheja, S., Ahmed, A., Bhat, R. B., Stiharu, I., Richard, M. J. (2005). "Evaluation de la Problematique Reliee a L'instabilite en Reversement des Vehicules Routiers de Type Citerne Transportant des Produits Liquides" Forum de transfert en Sécurité Routière "Un Savoir à Partager".
  25. Kang, X., Rakheja, S., Stiharu, I. (2000). "Effects of Tank Shape on the Roll Dynamic Response of a Partly Filled Tank Vehicle". *Vehicle System Dynamics*. Vol. 35, No. 2, pp. 75-102.
  26. Mucino, V.H. (2000). "Parameters of Trammel Pendulums to Simulate Lateral Sloshing in Partially Filled Elliptical Road Tankers". Department of Mechanical and Aerospace Engineering College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, University, Morgantown, WV, USA.
  27. Strandberg, Lennart. (1978). "Lateral Stability of Road Tankers". Main Report Volume I. Nr 138A. National Road and Traffic Institute. Linköping, Sweden.
  28. Mueller, T.H.; De Pont, J.J.; Baas, P.H. (1999). "Heavy Vehicle Stability versus Crash Rates". A report prepared for The Land Transport Safety Authority. July 9th, 1999. Transport Engineering Research New Zeland Limited.
  29. Braeckel, M., Smith, D., Tajar, Joseph G., Yourtee, J. (2000). "Fuel Resistant Plastics" Excerpts appeared in *Advanced Materials & Processes*, pages 37ff. Ticona, a business of Celanese AG. Summit, New Jersey
  30. Alvarado, Peter J. "Steel Vs. Plastics: The competition for light-vehicle fuel tanks". <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9507/Alvarado-9607.html>. Fecha de consulta: Noviembre de 2005.
  31. <http://www.swj2.org/PolyethyleneAutomotivefuel tanks.html>. Fecha de consulta: Diciembre de 2006.
  32. Favela Gallegos, Carlos Adrián; Ramírez Valencia, Andrés; Fabela Gallegos, Manuel de Jesús; Vázquez Vega, David; Hernández Jiménez, José Ricardo. (2005). "Prototipo de Tonel a Escala para Estudio de Oleaje en el Autotransporte de Líquidos". Artículo No. A58IE7 pp. IE57-IE62, Memorias del XI Congreso Anual de SOMIM y IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica de la SOBIM. 21 al 23 de Septiembre de 2005. Morelia, Mich.
  33. Langhaar, Henry L. (1951). "Dimensional Analysis and Theory of Models". John Wiley and Sons, Inc. USA.

34. Sonin, Ain A. (2001). "The Physical Basis of Dimensional Analysis". Second Edition. Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA.
35. Vignaux, G.A., Scott J.L. (2001). "Simplifying Regression Models Using Dimensional Analysis".
36. Mendez, P.F. (2005). "Scaling Laws in Welding Modeling". Presented at the Trends in Welding Research Conference. Pine Mountain, GA.
37. <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Physics/Mechanics/FluidMechanics/Dimensional/SimilarityModelling/SimilarityModelling.htm>. Fecha de consulta: Enero de 2000
38. Strandberg, L., Nordstorm, O., and Nordmark, S. (1975). "Safety Problems in Commercial Vehicles Handling," Proceedings, Symposium on Commercial Vehicles Braking and Handling, Highway Safety Research Institute, University of Michigan.
39. Ramírez Valencia, Andrés. (2006). "Evaluación experimental de la efectividad de rompeolas en un tonel elíptico a escala reducida" Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Querétaro. Querétaro, Qro.
40. Montgomery, Douglas C. (2004). "Diseño y Análisis de Experimentos". Ed. Limusa.
41. MINITAB for Windows. (2003). Version 14. Minitab Inc. Versión de Evaluación.
42. Ramírez Valencia, Andrés; Martínez Madrid, Miguel; Favela Gallegos, Carlos Adrián; Fabela Gallegos, Manuel de Jesús. (2005). "Evaluación estadística experimental de la fuerza de oleaje longitudinal en un tonel a escala". Artículo No. A59IE8 pp. IE63-IE68, Memorias del XI Congreso Anual de SOMIM y IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica de la SOBIM. 21 al 23 de Septiembre de 2005. Morelia, Mich.
43. Fabela-Gallegos, Manuel J.; Ramirez-Valencia, Andres; Favela-Gallegos, Carlos A.; Vazquez-Vega, David; Martinez-Madrid, Miguel. (2005). "Experimental Assessment of Baffles and Their Effect on the Longitudinal Sloshing Force in a Scaled Elliptical Tank" SAE Paper No. 2005-01-3577. 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition. Chicago, IL, USA.
44. Fabela-Gallegos, Manuel J.; Vazquez-Vega, David; Martinez-Madrid, Miguel; Favela-Gallegos, Carlos A.; Ramirez-Valencia, Andres. (2005). "Experimental Evaluation of Baffles Geometry and their Configuration in a Partially Filled Scaled Elliptical Tank" SAE Paper No. 2005-01-3581. 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition. Chicago, IL, USA.

45. Diccionario Larousse de la lengua española. (1982). Ediciones Larousse. México, DF.
46. Askeland, Donald R. (2001). "Ciencia e Ingeniería de los Materiales". 3ª Edición. International Thomson Editores.
47. Granta Design Limited. (2000). Cambridge Engineering Selector, Versión 3.1. Versión de Evaluación.
48. ASM Handbook, Vol. 20. (1989). "Materials Selection and Design". ASM International. The Materials Information Society.
49. Oberg, E.; Jones, F. D.; Horton, H. L.; Ryffel, H. H.; Green, R. E. (1992). "Machinerys handbook". 24th edition. Industrial Press Inc. New York, USA.
50. [www.thefabricator.com/PressTechnology/PressTechnology\\_Article.cfm?ID=139](http://www.thefabricator.com/PressTechnology/PressTechnology_Article.cfm?ID=139). Fecha de consulta: Diciembre de 2006.
51. Bayer MaterialScience. (2004). "Robust materials from the shop window. Oil and gasoline polyurethanes for rotational casting". Bayer MaterialScience AG Communications. Leverkusen, Germany.
52. MatWeb. Material Property Data. <http://www.matweb.com>. Fecha de consulta: Diciembre de 2006.



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,  
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))

**CIUDAD DE MÉXICO**

Av Nuevo León 210, piso 2  
Col Hipódromo Condesa  
06100, México, D F  
tel (55) 5265 3190  
fax (55) 5265 3190 ext 4711

**SANFANDILA**

km 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro  
tel (442) 216-9777  
fax (442) 216-9671

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)