



DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DE AUTOTANQUES ANTE VOLCADURAS

ASPECTOS NORMATIVOS Y DE DISEÑO

José Antonio Romero Navarrete
Jesús Mateo Fortanell Romero
Oswaldo Ramírez Cano
Robert Hildebrand
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No. 218
Sanfandila, Qro, 2003

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

**Dispositivos de protección de
Autotanques ante volcaduras**

**Aspectos normativos y de
diseño**

**Publicación Técnica No. 218
Sanfandila, Qro, 2003**

En el contexto del estudio de la seguridad carretera de los vehículos para transporte de sustancias líquidas a granel, se presenta un estudio teórico-experimental el cual cubre algunos aspectos de diseño y normativos de los dispositivos, que montados en los toneles de los autotanques, sirven para proteger las conexiones y registros de autotanques ante volcaduras.

Para la elaboración del documento se tomaron en cuenta las opiniones y observaciones de David Vázquez Vega, Manuel de Jesús Fabela y Alejandro Lozano Guzmán. El trabajo fue revisado por el Dr. Miguel Martínez Madrid, coordinador de equipamiento para el transporte.

Resumen	IX
Abstract	XI
Resumen ejecutivo	XIII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Alcance y contenido	4
Capítulo 2. Análisis de la tendencia a la volcadura de vehículos pesados	7
2.1 Análisis paramétrico de la tendencia a la volcadura Usando el modelo <i>yaw-roll</i>	7
2.2 Análisis de sensibilidad paramétrica	23
Capítulo 3. Revisión de la normatividad acerca de los dispositivos de protección ante volcaduras	27
3.1 Regulaciones nacionales	27
3.2 Regulaciones estadounidenses	31
3.3 Análisis comparativo de los requerimientos normativos de Estados Unidos (DOT)– México (SCT)	34
3.4 Discusión	37
Capítulo 4. Diseño conceptual de protecciones ante volcaduras	39
4.1 Metodología del diseño en ingeniería	39
4.2 Diseño conceptual	42
Capítulo 5. Elementos para una propuesta de norma para los dispositivos de protección ante volcaduras	63
5.1 Simulación de volcaduras en la Universidad de Michigan	63
5.2 Análisis de las áreas de impacto y severidad	64
5.3 Criterios de desempeño para las protecciones	68
5.4 Elementos en un proyecto de norma para el diseño y configuración de dispositivos de protección ante volcaduras	76

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	79
---	-----------

Referencias	83
--------------------	-----------

Los vehículos diseñados para transportar líquidos peligrosos a granel están equipados con protecciones ante de volcaduras. Con esto se evita que los accesorios y válvulas en la parte superior de los toneles de los autotanques, se dañen en caso de sufrir este tipo de percance. En caso de falla de estos dispositivos de protección, las consecuencias pueden ser graves, como presentarse derrames de sustancias tóxicas o inflamables. Al respecto, en el contexto internacional se tiene la idea de que tales dispositivos carecen de las características físicas necesarias para proveer una respuesta suficiente y efectiva.

Esta percepción se deriva en parte por la ocurrencia de accidentes en los que se reportó la falla de estos equipos, y por que la normatividad de diversos países no establece requerimientos lo suficientemente específicos. En el caso de México, tales requerimientos regulatorios, basados en normas estadounidenses, definen únicamente la resistencia que deberían tener con base en la aplicación, de manera estática, de cargas horizontales y verticales. Esto es, no se incluye en tales requerimientos consideración alguna de las características dimensionales y geométricas que esos dispositivos deberían cumplir, aparte de limitar el desempeño a una carga estática arbitraria.

Se presenta un análisis de los diseños actuales para dispositivos de protección ante volcaduras, incluyendo el desarrollo de un diseño conceptual de un dispositivo, el cual por su particular geometría pudiera proporcionar mayor protección durante el impacto de los toneles contra los equipos y demás partes en las carreteras y calles. Se incluye un análisis de las normatividades estadounidense y mexicana con relación a estos equipos, identificando elementos comunes y discrepancias.

Con base en simulaciones de volcaduras reportadas por la Universidad de Michigan, se propone una norma de desempeño para los dispositivos de protección ante volcaduras, basada en la velocidad de impacto en las tres direcciones. Los elementos normativos propuestos incluyen algunas características geométricas de los dispositivos, reconociendo dos niveles de protección.

A través de simulaciones numéricas y teniendo como objetivo identificar cómo mejorar el comportamiento dinámico de los vehículos, se incluye un análisis de los factores que influyen en la tendencia a la volcadura, estableciendo parámetros geométricos y de rigidez de los componentes de los vehículos. Los resultados de tales simulaciones muestran que las características geométricas de los camiones son las que mayormente definen su tendencia a volcarse.

Se obtiene que una combinación óptima de los factores geométricos y de rigidez puede hacer disminuir, hasta en un 50%, la tendencia de los vehículos a sufrir volcaduras.

To avoid liquid cargo spills due to damages caused to man-holes and fittings mounted on the top of their tanks, tank trucks are equipped with rollover protection devices (RPD). If the cargo consists of any dangerous substance, failure of such protection devices can have serious consequences. Due in part to accidents in which RPD's have failed, there exists the international perception that the present RPD's designs, lack the needed characteristics to provide an effective and sufficient protection. Such perception also derives from the fact that the present regulations do not give sufficient specifications for those components. Mexican regulation, based on American standards, only establish some (static) loads that the RPD should sustain. That is, regulations indicate an arbitrary static load to be resisted, without clarifying any criteria about the geometrical and dimensional characteristics that RPDs should have.

This work presents an analysis of the present designs for RPDs, including the development of a conceptual design of a new RPD, which is thought would provide a better protection during tank crashing against road and streets equipments. It is also presented an analysis of the current regulations in Mexico and USA, identifying some common characteristics and differences. Using rollover simulation results reported by The University of Michigan, a draft standard is proposed for RPDs performance, considering three-dimensional impact velocities. The proposed standard considers a two-level protection. To identify ways to improve the vehicle's dynamic performance, computer simulation is used for evaluating the influence of vehicle's geometrical and stiffness characteristics on vehicle's rollover trend. Results show that geometric characteristics are the more influential factors affecting vehicles' rollover trend, and that an optimal combination of factors can represent a reduction of up to 50 percent in the vehicle's rollover trend.

Resumen ejecutivo

El transporte carretero de sustancias líquidas puede darse a granel o en diversos tipos de contenedores que pueden significar diferentes niveles de peligrosidad. De ahí que existan normatividades internacionales especializadas en el transporte de sustancias peligrosas, las cuales incluyen desde la codificación de las sustancias hasta los procedimientos de carga y descarga de las mismas.

Los camiones denominados autotankes están diseñados para transportar sustancias líquidas peligrosas a granel, de ahí la necesidad de equiparlos con dispositivos de protección ante la ocurrencia de volcaduras. Su objetivo es evitar que los accesorios y válvulas, instalados en la parte superior de los toneles de los autotankes, se dañen en caso de un percance en el que pierda el equilibrio de la verticalidad.

La falla en los dispositivos de protección puede tener graves consecuencias para la infraestructura y para otros usuarios de las carreteras, al representar dicha falla fugas potenciales de materiales tóxicos o inflamables. Al respecto, existe la percepción internacional de que tales dispositivos carecen de las características físicas necesarias para proveer una protección suficiente y efectiva. Esto se deriva, aparte de la ocurrencia de algunos accidentes provocados por la falla de los equipos, de que la normatividad en los diversos países no establece requerimientos lo suficientemente específicos.

En el caso de México, tales requerimientos regulatorios, basados en normas estadounidenses, definen únicamente la resistencia que los dispositivos deberían tener, con base en la aplicación estática, de cargas horizontales y verticales. Esto es, no se incluye en tales requerimientos consideración alguna de las características dimensionales y geométricas que tales dispositivos deberían cumplir, aparte de limitar el desempeño a una carga estática arbitraria.

Se presenta un análisis de los diseños de aplicación actual para los dispositivos de protección ante volcaduras, incluyendo el desarrollo de un diseño conceptual que, por su particular geometría, pudiera proporcionar una mayor protección durante el impacto de los toneles contra los equipos y partes integrantes de carreteras y calles. Se incluye un análisis de la normatividad estadounidense y mexicana en relación con estos equipos, identificando los elementos comunes y discrepancias. Con base en simulaciones de volcaduras reportadas por la Universidad de Michigan, se propone una norma de efectividad para estos dispositivos ante volcaduras, basada en la velocidad de impacto en las tres direcciones. Los elementos normativos propuestos incluyen algunas características geométricas de los dispositivos, proponiendo dos niveles de protección.

Mediante simulaciones numéricas y con el objetivo de identificar procesos para mejorar el comportamiento dinámico de los vehículos, se incluye un análisis de los factores que influyen en la tendencia a la volcadura de los autotanques, estableciendo parámetros geométricos y de rigidez determinantes en los componentes vehiculares. Los resultados de las simulaciones muestran que las características geométricas de los camiones son las que mayormente definen su tendencia a volcarse. Se obtiene que una combinación óptima de los factores geométricos y de rigidez puede hacer disminuir, hasta en un 50%, la tendencia de los vehículos a sufrir volcaduras.

Capítulo 1. Introducción

En el más general de los conceptos, la seguridad se ha definido como “Una condición que se alcanza a través del proceso sistemático de identificar posibles riesgos, y de desarrollar e implementar programas de regulación para minimizar esos riesgos, los cuales estén orientados a la prevención de la pérdida de vidas y daños a la propiedad o al ambiente, derivados de accidentes o incidentes” (Sweet, 1996). Este carácter preventivo del concepto de la seguridad se ha refinado al incorporar los conceptos de seguridad activa y seguridad pasiva. En tanto que la seguridad activa engloba todas las acciones y aspectos tendientes a evitar la ocurrencia de accidentes, la seguridad pasiva atiende el desarrollo de equipos y procedimientos que buscan minimizar las consecuencias de los accidentes en cuanto a las lesiones potenciales sufridas por las personas (Mayenburg, 1996). La seguridad carretera depende, en buena medida, de las características de seguridad activa y pasiva incorporadas en los vehículos pesados.

En el caso de vehículos tipo autotanque, empleados en el transporte carretero a granel de sustancias líquidas, su desempeño seguro es función de una multitud de factores, ligados a las características especiales de estos vehículos y a sus condiciones de operación, cuya seguridad vial depende en gran medida de las condiciones de operación, como velocidad de tránsito y nivel de llenado del autotanque. Al respecto, se ha demostrado que el movimiento del fluido en el interior del contenedor con niveles parciales de llenado, provoca situaciones peligrosas, caracterizadas por inducir la volcadura (Winkler, 1998; Ervin, 1980; Sankar, 1992; Strandberg, 1978).

Para enfrentar esta situación, se han ido incorporando en sus diseños, diferentes componentes que constituyen elementos de seguridad tanto activa como pasiva. Como ejemplo de componentes de seguridad activa, están los rompeolas transversales y longitudinales con que se equipa la mayoría de las veces. Los rompeolas se diseñaron para disminuir el oleaje de los líquidos en el interior de toneles cargados parcialmente, proporcionando así una mayor estabilidad y manejabilidad de los autotanques. Como elementos de seguridad pasiva, se cuenta con las protecciones ante la ocurrencia de volcaduras, cuyo objetivo es evitar que las conexiones, accesorios y válvulas en el domo de tales vehículos, se golpeen durante una volcadura.

La fig 1 ilustra los accesorios que normalmente van montados en la parte superior de los tanques, comprendiendo lo que se conoce como domo del tonel. Estos elementos incluyen una entrada pasa-hombre (1), una tubería/válvula de alivio (2), y un registro de verificación del nivel de llenado

del tonel (3); se instalan en los autotanques, uno a uno de los compartimentos con que esté equipado el tonel.

La fig 2 ilustra el diseño típico de protección ante volcaduras del domo de los autotanques, cuyas características geométricas no están reguladas, sino únicamente su resistencia ante cargas estáticas en diferentes direcciones (NOM, 1995; DOT, 2001).

Volcadura de vehículos tipo autotanque

En el contexto de la seguridad vial, resulta de especial preocupación el fenómeno de volcadura de camiones que transportan materiales líquidos peligrosos. En tales situaciones, la falla de los elementos de protección suele ocasionar la fractura de válvulas y conexiones, lo que potencialmente puede dar lugar a derrames tóxicos y conflagraciones.

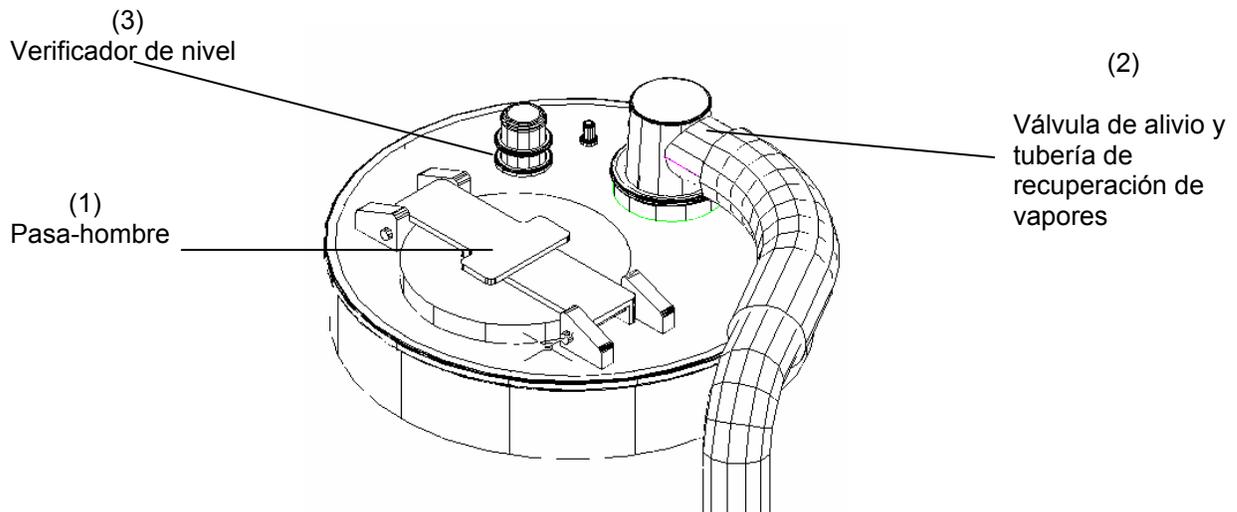


Fig 1. Arreglo de los componentes montados en los domos de los toneles

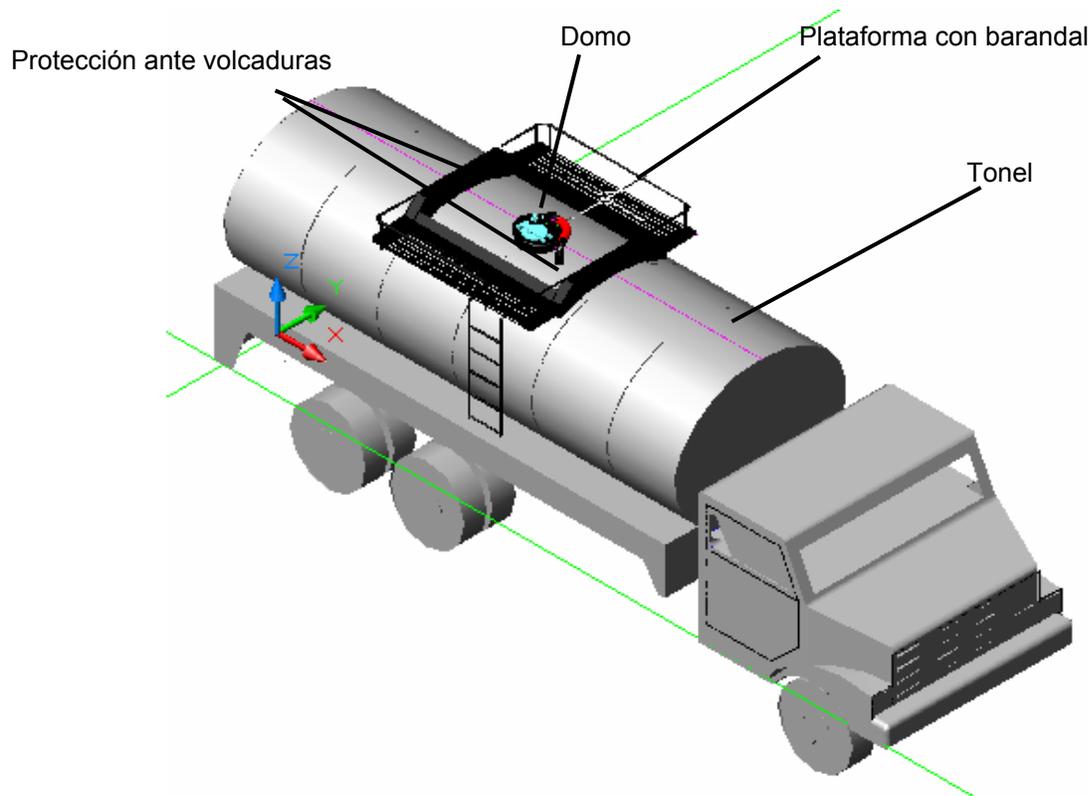


Fig 2. Vehículo autotanque con protecciones ante volcadura

Normatividad en los dispositivos de protección ante volcaduras

Las normas nacionales obligatorias (NOM), que regulan el diseño de los toneles de los autotanques, son adaptaciones de las versiones norteamericanas (DOT, *Department of Transport*) y, como se ha indicado, carecen de cualquier definición en cuanto a las características geométricas de este tipo de protecciones; tales regulaciones no establecen estipulaciones acerca de los espacios volumétricos protegidos, ya sea el área o la altura de tales protecciones. No se menciona en esas normas, por ejemplo, el nivel de deflexión o deformación de estos dispositivos.

En lo que se refiere a la resistencia de los dispositivos de protección, las regulaciones establecen ciertos niveles de resistencia estática, sin que exista justificación física alguna para los valores especificados (NTSB, 1992).

Diseño de los dispositivos de protección ante volcaduras

La carencia de estipulaciones normativas que definan características geométricas de los dispositivos de protección ante volcaduras, ha provocado que los diseños varíen enormemente en la práctica, tanto en formas como en arreglos, existiendo en general protecciones continuas y discretas. La fig 3 ilustra ambos ejemplos: la parte (a) muestra un diseño de protección discreta, y la parte (b) una protección continua. En las regulaciones existentes, no hay ninguna observación en cuanto al tipo de protección que debería emplearse en cierta aplicación.

1.1 Objetivo

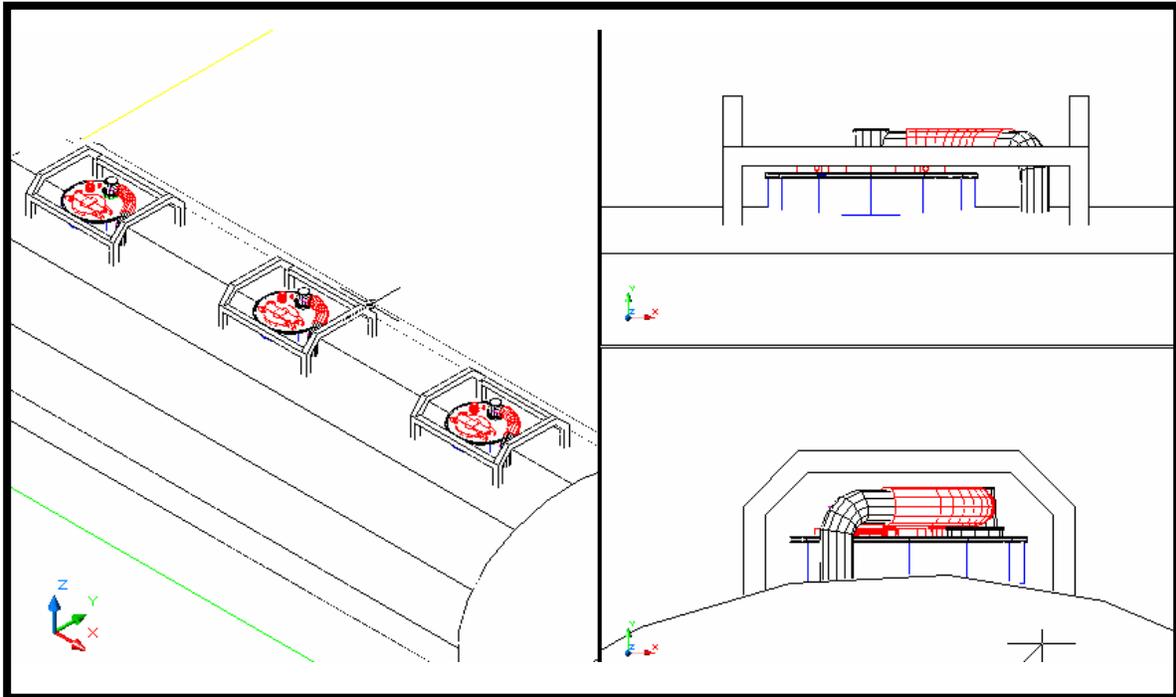
El objetivo de este trabajo es presentar un análisis de los aspectos normativos y de diseño, aplicados a las protecciones ante volcaduras de vehículos tipo autotanque, proponiendo mejoras en el diseño de estos equipos como en las normas a que están sujetos. Asimismo, caracterizar las propiedades de las unidades que pudieran disminuir su tendencia a la volcadura.

1.2 Alcance y contenido

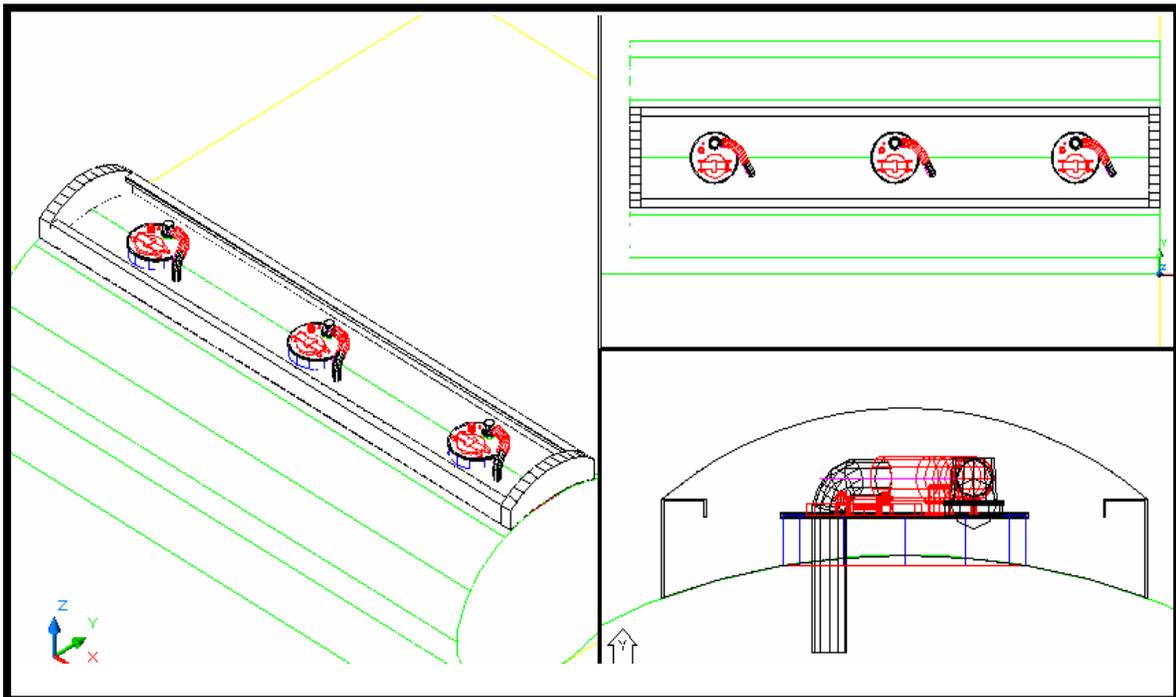
Se analiza la normatividad en Estados Unidos y en México en lo relativo a la prevención de volcaduras, incluyendo en el caso de México, una reseña general de las normas que rigen el transporte de materiales peligrosos. Se analizan, asimismo, distintos diseños para estos dispositivos de protección.

Respecto al diseño general de los autotanques, y atendiendo la necesidad de prevenir accidentes, se incluye, en el capítulo 2, un análisis paramétrico de los aspectos de diseño y de operación que influyen en la tendencia a la volcadura. Por medio de simulaciones mediante el programa *yaw-roll* de la Universidad de Michigan, se plantean distintas medidas de desempeño en parámetros de diseño geométricos y de funcionamiento de los vehículos, lo que permite identificar los más importantes parámetros que conducen a mejorar el comportamiento dinámico de los vehículos.

En el capítulo 3 se presenta una revisión de la normatividad en México y Estados Unidos con respecto a las especificaciones de toneles para el transporte de líquidos. Se incluye un análisis paralelo de los contenidos de ambas normatividades, identificando los respectivos elementos comunes y discrepantes.



(a)



(b)

Fig 3. Ejemplos de dos tipos de protecciones, (a) discreta; (b) continua

En el capítulo 4 se presenta un diseño conceptual de una protección ante volcadura, incluyendo la metodología del diseño en ingeniería, que define las necesidades de diseño y las etapas de recopilación y conceptualización. Como etapa de diseño conceptual se adicionan los módulos identificados para el equipo y las interacciones entre estos diferentes módulos. Se describe finalmente el diseño conceptual resultante.

El capítulo 5 hace referencia a la creación de una norma de desempeño para protecciones ante volcaduras de autotanques. Al respecto, y con objeto de obtener elementos para definir los criterios de diseño normativos respectivos se analizan los resultados de simulaciones de volcaduras de autotanques reportadas por la Universidad de Michigan. Con base en estos resultados, se establecen los valores de las velocidades de impacto capaces de resistir este tipo de equipamientos de protección. Se proponen, asimismo, dos niveles de protección.

Las conclusiones de este trabajo se incluyen en el capítulo 6, tanto en los aspectos preventivos de diseño en este tipo de vehículos para disminuir su tendencia a la volcadura, como los aspectos de diseño y normativos propuestos en este trabajo.

Capítulo 2

Análisis de la tendencia a la volcadura de vehículos pesados

Los accidentes viales son atribuibles a una combinación de factores, ligados con las condiciones de operación (derivadas del operador y del vehículo), las condiciones de la infraestructura (nivel de rugosidad y diseño geométrico), y con las características de diseño del vehículo. En este contexto, todo aquello relacionado con medidas para evitar percances en unidades pesadas, es posible ubicarlo en dos grandes grupos: aquellas acciones y medidas tendientes a evitar los accidentes, conocidas como seguridad activa y, por otro lado, las acciones y medidas tendientes a evitar el daño a los conductores o a la carga durante los accidentes, conocidas como seguridad pasiva (Romero, 2002). De esta manera es posible incluir, como ejemplos de acciones de seguridad activa, las medidas que tratan de evitar: 1) que el vehículo sea poco visible a otros conductores; 2) que el conductor se canse y, por tanto, disminuyan sus niveles de atención y velocidad de reacción ante situaciones peligrosas, y 3) que el diseño del vehículo sea intrínsecamente inestable.

Las medidas de seguridad pasiva se relacionan con el desarrollo de bolsas de aire y todo aquello que evite que el conductor y pasajeros sufran mayores consecuencias en un choque. Como medidas de seguridad activa destacan aquellas que hacen más estables a los vehículos, por cuanto a su estabilidad lateral o tendencia a la volcadura. Tales medidas consideran algunas características geométricas y de funcionamiento de los componentes vehiculares.

Considerando que existen diferentes medidas que pudieran eliminar o disminuir la tendencia a la volcadura, en esta sección se presenta un análisis, por simulación numérica, del efecto que distintos factores, geométricos y de operación del vehículo, tienen sobre la tendencia a la volcadura de unidades pesadas. El modelo, llamado *yaw-roll*, corresponde a un desarrollo del Instituto para la Investigación en el Transporte, de la Universidad de Michigan (Gillespie, 1982). Las características no lineales para la relación fuerza-deformación de las suspensiones de los vehículos, han sido incluidas en este trabajo, con objeto de establecer el efecto que sobre el comportamiento dinámico de los vehículos, tiene el empleo de suspensiones suaves, medianamente duras y duras.

2.1 Análisis paramétrico de la tendencia a la volcadura usando el modelo *yaw-roll*

Se presenta un análisis, por simulación, del efecto que tienen diversas características de diseño y operación en la estabilidad lateral de un autotanque. Como condición de operación se consideró la velocidad de desplazamiento del

vehículo (v), mientras que como características de diseño se incluyen la semi-separación entre las suspensiones (L); la rigidez de las llantas (k_L), la altura del centro de gravedad del vehículo (H); la semi-separación del ancho de vía (M), y la rigidez de la suspensión (k_s) (fig 4).

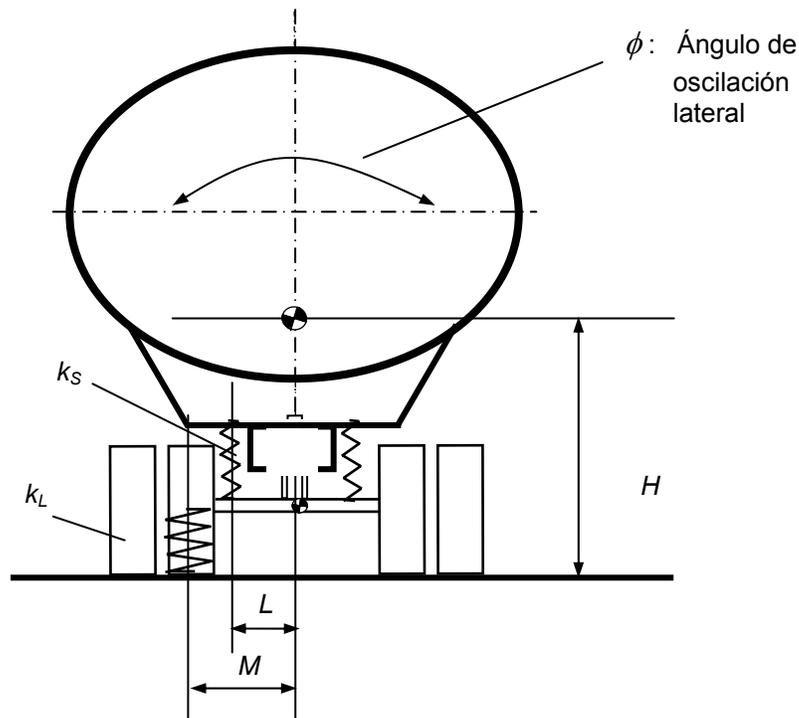


Fig 4. Parámetros principales que afectan la tendencia a la volcadura de un vehículo pesado

2.1.1 Medidas de desempeño

Un gran número de medidas de desempeño se han formulado para evaluar la estabilidad lateral dinámica de los vehículos (El-Gindy, 1995). Los transportes pesados, al someterlos a una perturbación direccional, experimentan una transferencia de carga lateral considerable entre las llantas internas y externas, como consecuencia de la oscilación del vehículo y la aceleración lateral. Consecuentemente, la transferencia lateral de carga se ha considerado como una medida efectiva para establecer la tendencia a la volcadura. Adicionalmente al valor máximo de la transferencia lateral de carga durante una maniobra dada; otras tres medidas de desempeño se han considerado en este estudio: aceleración lateral máxima, ángulo de oscilación lateral máximo, y velocidad angular máxima de oscilación lateral.

Relación de Transferencia Lateral de Carga (RTLC)

Como resultado de las maniobras direccionales, las cargas que las ruedas ejercen en el pavimento en cada extremo de los ejes, al alterarse representan una transferencia lateral de carga. La magnitud de esta transferencia proporciona una medida de la tendencia a la volcadura; se mide en términos de la relación de transferencia lateral de carga, y se define de la siguiente manera (El-Gindy, 1995):

$$RTLC = \left| \frac{F_{zl} - F_{zr}}{F_z} \right| \quad (1)$$

Donde F_{zl} es la suma de todas las fuerzas en las llantas de la izquierda; F_{zr} la suma de todas las fuerzas de las llantas del lado derecho, y F_z la suma de todas las cargas de las llantas sobre el pavimento (fig 5). Esta ecuación muestra que el valor de $RTLC$ se aproxima a la unidad cuando las fuerzas sobre un sólo extremo de los ejes (ruedas izquierdas o derechas) pierden contacto con la superficie del camino, indicando una situación que puede desembocar en una volcadura inevitable. En la literatura se recomienda que los valores máximos para esta relación sean menores de 0.6 (El-Gindy, 1995).

Aceleración lateral (a_L), ángulo de oscilación lateral (ϕ), y velocidad angular de oscilación lateral ($\dot{\phi}$)

Estas medidas de desempeño son consideradas en el análisis del efecto de distintos factores sobre la tendencia a la volcadura. De manera contraria al caso del $RTLC$, para estas variables no se reportan en la literatura valores máximos recomendados. La fig 5 muestra estas características de la respuesta dinámica de un vehículo ante perturbaciones direccionales.

2.1.2 Maniobra considerada

En distintos estudios se ha propuesto el uso de maniobras estandarizadas, con objeto de evaluar la estabilidad relativa y las características de desempeño de los vehículos pesados (El-Gindy, 1995). La fig 6 ilustra una maniobra estandarizada de cambio de carril, la cual será seguida por el sistema de control de dirección del vehículo simulado (El-Gindy, 1995). Se puede decir que esta maniobra representa una operación altamente demandante para un vehículo, en caso de efectuarse a una velocidad mayor de 100 km/h.

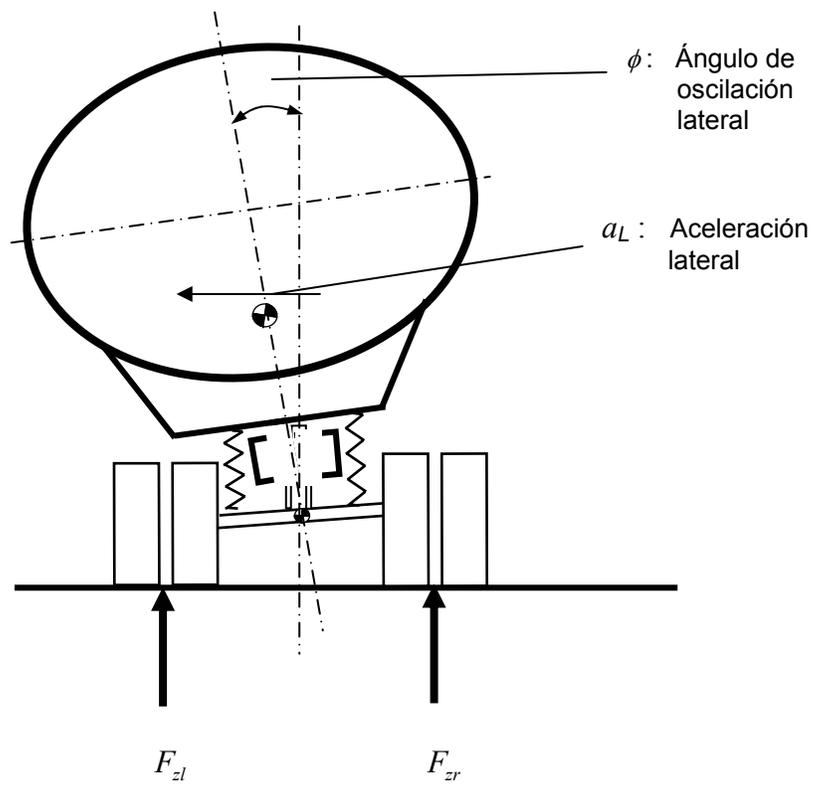


Fig 5. Medidas de desempeño de la tendencia a la volcadura de los vehículos pesados

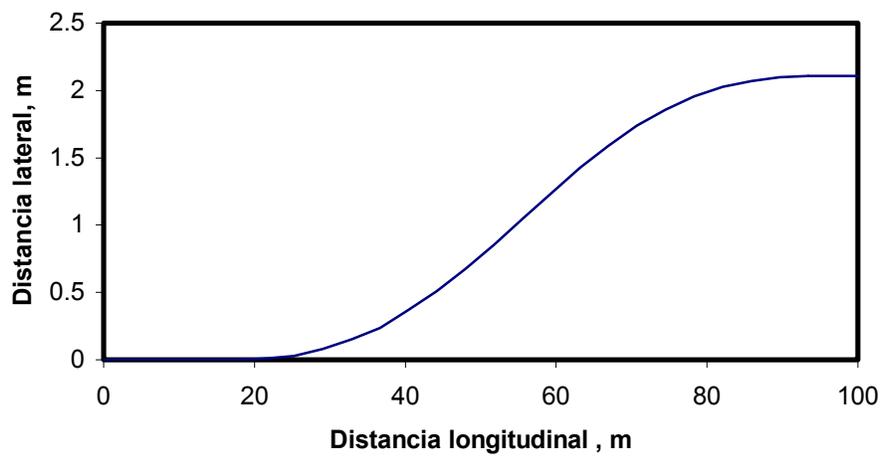


Fig 6. Maniobra estándar de cambio de carril (El-Gindy, 1995)

2.1.3 Características invariables del vehículo simulado

Un gran número de características define el comportamiento de los vehículos al efectuar maniobras direccionales. Dichas características, que han sido consideradas constantes durante las simulaciones, se listan en la tabla 1. Consisten tanto en geométricas como de funcionamiento del vehículo. Las de inercia corresponden a un vehículo tipo autotank cargado al 100%, en el que el momento de inercia de la oscilación lateral ha sido disminuido, para tomar en cuenta la existencia de líquido en vez de una carga sólida (Winkler, 1998). Esta disminución en el valor del momento de inercia en la oscilación lateral, se deriva de que el fluido, al contrario de una carga sólida, no gira con el resto del cuerpo del vehículo durante sus oscilaciones laterales.

Tabla 1. Valores invariables durante las simulaciones paramétricas de la tendencia a la volcadura de autotankes *

Masa del autotank (kg):	22713
Momento de inercia en oscilación lateral (<i>roll</i>) (kgm^2):	22000
Momento de inercia en oscilación longitudinal (<i>pitch</i>) (kgm^2):	153498
Momento de inercia en oscilación vertical (<i>yaw</i>) (kgm^2):	149202
Cargas en los ejes (N):	60988,95404,95404
Peso de los ejes (N):	6688,11147,11147
Momento de inercia en oscilación lateral de los ejes (kgm^2):	593,856,856
Posiciones de los ejes (respecto al centro de gravedad del vehículo):	4.36,0.81,2.159
Centro de oscilación de los ejes (m):	0.508,0.737,0.737
Separación de las llantas duales (m):	0, 0.3429,0.3429
Rigidez auxiliar ($\text{Nm} / ^\circ$):	996.7,1132.6,1132.6
Fuerza de fricción seca en las suspensiones (N):	1114.8,2229.5,2229.5
Constante de amortiguamiento viscoso en las suspensiones ($\text{N s} / \text{m}$):	1755,3511,3511

* La velocidad de operación del vehículo, para las simulaciones en las que esta velocidad se considera como un parámetro, es de 80 km/h

2.1.4 Efecto de la velocidad del vehículo (v)

Las diferentes partes de la fig 7 ilustran el efecto de la velocidad de circulación de un vehículo pesado sobre su tendencia a la volcadura, expresada en función de las medidas de desempeño descritas en 2.1.1. Estos resultados indican una relación aproximadamente proporcional entre los incrementos de velocidad y la respuesta del vehículo, revelando que la velocidad angular de oscilación lateral máxima ($\dot{\phi}$), tiene una sensibilidad ligeramente más grande a velocidades mayores. Esta linealidad entre la perturbación y las medidas de desempeño se atribuye en este trabajo a la linealidad considerada para el comportamiento de la relación fuerza-deformación de las suspensiones. Por otro lado, se observa en este caso que los valores para el *RTL*C se encuentran dentro de los niveles calificados como aceptables para esa medida (El-Gindy, 1995).

2.1.5 Efecto del semi-espaciamiento de las suspensiones (L)

Los resultados contenidos en la fig 8, por cuanto al efecto de la variación del semi-espaciamiento de las suspensiones sobre la tendencia a la volcadura, revelan una relación no-lineal inversa, entre ese parámetro y las distintas variables para evaluar la tendencia a la volcadura del vehículo. Los valores observados para el *RTL*C revelan que la situación simulada está lejos de representar un percance.

Es importante señalar que la viabilidad para modificar la separación de las suspensiones de los vehículos, depende a su vez de la factibilidad de modificar el espacio ocupado por las llantas duales consideradas, lo cual se asocia también a la posibilidad de contar con un chasis de distinto ancho. La implementación de esta medida dependerá de un análisis costo-beneficio de las modificaciones necesarias.

2.1.6 Efecto de la altura del centro de gravedad del vehículo (H)

En cuanto al efecto de las variaciones de la altura, H , en la tendencia a la volcadura, los resultados mostrados en la fig 9 ilustran una relación aproximadamente lineal, directa, entre la posición del centro de gravedad del vehículo y su tendencia al percance.

La factibilidad de desarrollar modelos de vehículos con un centro de gravedad bajo, depende de la posibilidad de experimentar con distintos aspectos del diseño del vehículo, los cuales afectan directamente esta altura H . Entre los elementos de diseño que es necesario analizar para reducir H , se incluye la altura del chasis y la de los durmientes de madera que comúnmente van montados entre el chasis y la silleta de soporte del tonel. Asimismo, la forma del tanque, respecto a la cual hay propuestas alternas para los toneles, que implican una menor altura H (Kang, et al, 2000). Finalmente, un aspecto que también ha sido explorado para disminuir la altura H , es la utilización de llantas de perfil bajo.

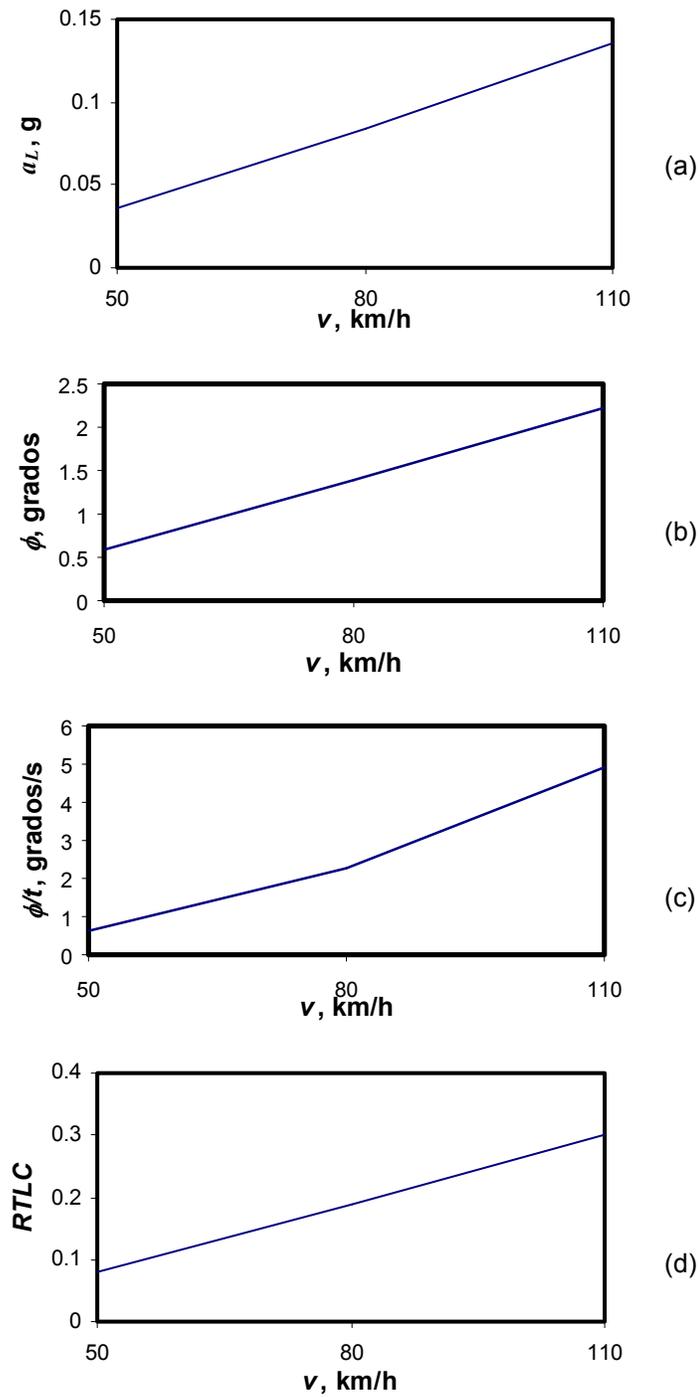


Fig 7. Efecto de la velocidad de tránsito sobre las medidas de desempeño en la tendencia a la volcadura del vehículo considerado

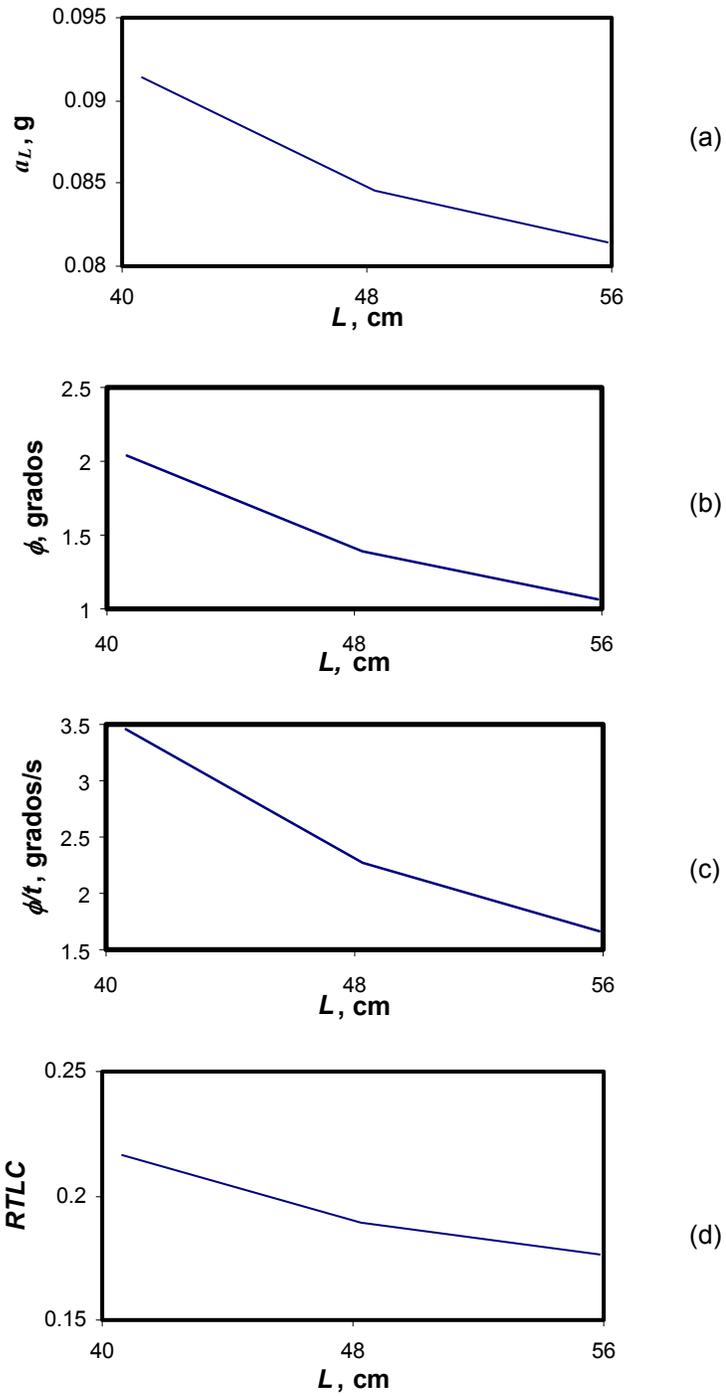


Fig 8. Efecto del semi-espaciamento de las suspensiones sobre los valores de las medidas de desempeño consideradas

La sensibilidad de las medidas de desempeño consideradas, a la variación de este parámetro H , así como de otras características se analizarán en el subcapítulo 2.2.

2.1.7 Efecto de la variación del semiespaciamiento del ancho de vía (M)

La fig 10 ilustra la relación entre la magnitud del semiancho de vía y la tendencia a la volcadura. Esta relación es en general no lineal, revelando una disminución en la sensibilidad de los indicadores de desempeño del vehículo en la medida en que el ancho de vía se incrementa. Esto es, la mejora en el comportamiento del vehículo no crece en igual velocidad para el rango de variaciones considerado, en esta característica geométrica del vehículo.

La factibilidad de incrementar en la práctica el ancho de vía de los vehículos se ve restringida, por un lado por las características dimensionales normalizadas de los caminos en cuanto al ancho de vía. Por otro lado, por las dimensiones, también normalizadas, de las llantas duales. Sin embargo, existe una modalidad tecnológica que podría dar lugar a un ancho de vía mayor para vehículos pesados: el uso de llantas sencillas de base ancha ("super-sencillas"), las cuales están actualmente entrando en los mercados automotrices en todo el mundo. Tales llantas, aparentemente tienen otras ventajas, como son la disminución de consumo de combustible y del ruido emitido, aparte de que proveen una mayor suavidad de marcha. En contrapartida, se han encontrado perjudiciales para los caminos al ejercer presiones mayores sobre el pavimento.

La implantación de un ancho de vía mayor para los vehículos, depende de estudios más generales e interdisciplinarios, que den luz acerca de la conveniencia neta de emplear llantas de base ancha en vez de las tradicionales llantas duales.

El análisis de sensibilidad presentado en el siguiente apartado, dará elementos adicionales en cuanto a la importancia de la mejora de esta propiedad sobre la tendencia a la volcadura de los vehículos pesados.

2.1.8 Efecto de la variación de la rigidez de las llantas (k_L)

Las gráficas de la fig 11 muestran el efecto de la variación en la rigidez de las llantas sobre la tendencia a la volcadura, revelando una relación que en forma aproximada es inversamente proporcional. De esta manera, el empleo de llantas más rígidas en el sentido vertical causa un mejor desempeño del vehículo en cuanto a la tendencia a la volcadura. La tendencia ilustrada en estos resultados es la esperada, denotando la necesidad de analizar los efectos negativos de este incremento en la rigidez de las llantas. El crecimiento en la rigidez de las llantas está asociado a una presión de inflado incrementada.

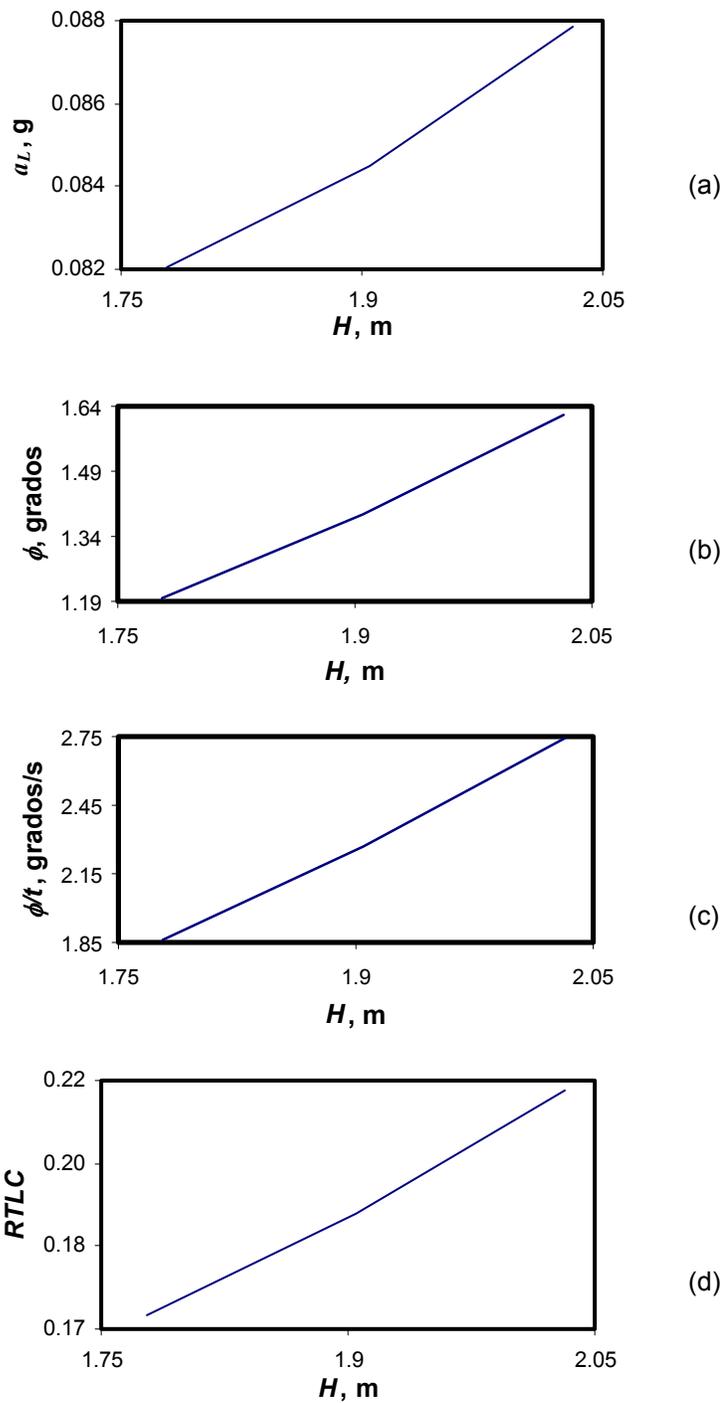


Fig 9. Efecto de la altura del centro de gravedad del vehículo sobre la tendencia a la volcadura

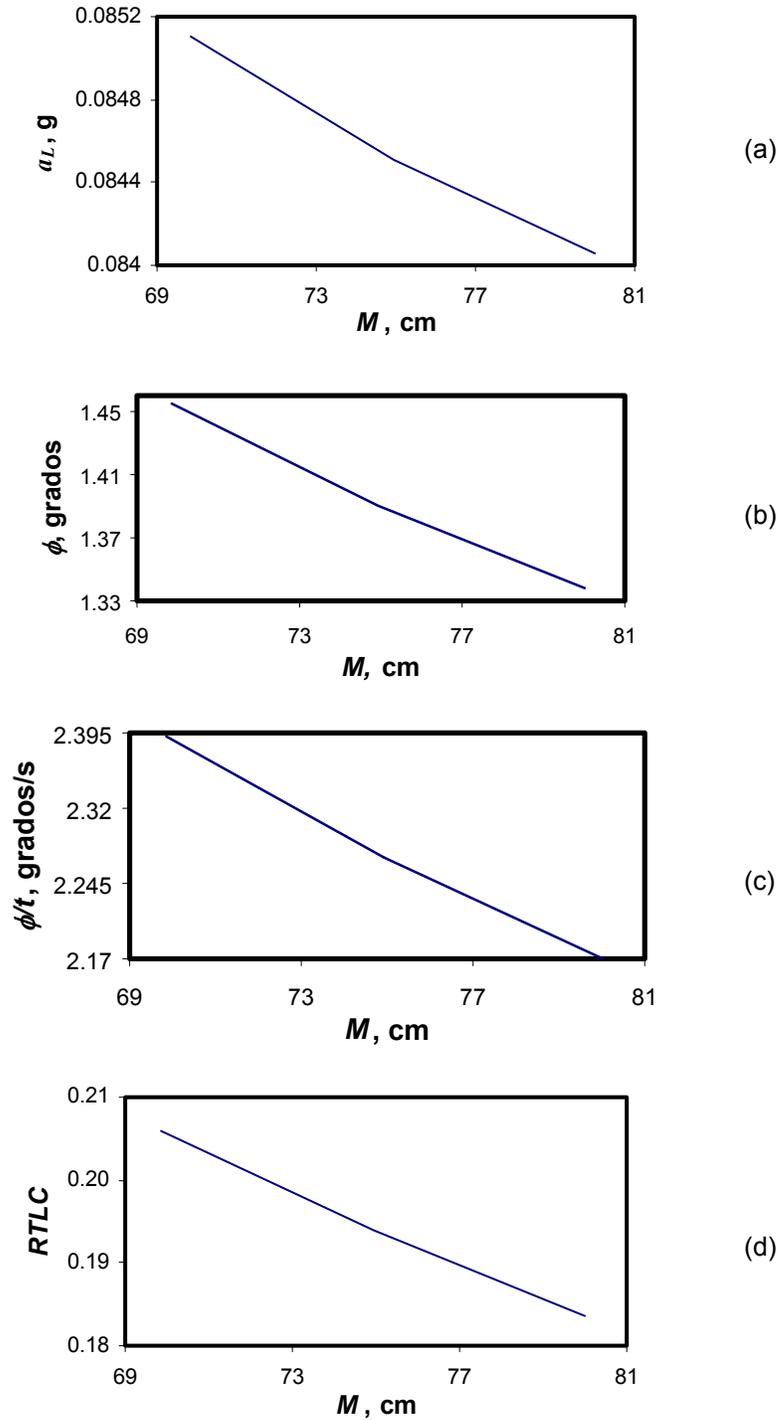


Fig 10. Efecto de la variación del semiespaciamento de la vía del vehículo sobre las variables de la tendencia a la volcadura del vehículo ensayado

El efecto negativo del incremento en la presión de inflado de las llantas se observa en dos aspectos. Por un lado, la dinámica de respuesta vertical del vehículo al perfil del pavimento se vería alterada, manifestándose en mayores niveles de vibración en los componentes de la unidad y de la carga. Por otro lado, una presión incrementada en los neumáticos provoca mayores esfuerzos normales en los pavimentos, aumentando el daño potencial de los pavimentos a cargo de los vehículos.

Es importante hacer notar que un incremento en los niveles de vibración de los componentes del transporte, puede implicar una mayor vibración de la cabina del camión, lo que potencialmente incide en la comodidad del conductor y el cansancio que él sufre. De esta manera, la implementación de presiones mayores de inflado en las llantas deberá desprenderse de análisis profundos de los perjuicios, y beneficios derivados de una medida de ese tipo.

El subcapítulo 2.2 se presentará un análisis de la importancia relativa de los distintos parámetros considerados, sobre la mejora en la estabilidad lateral del vehículo y su tendencia a la volcadura.

2.1.9 Efecto de la variación de la rigidez de la suspensión (k_s)

Las gráficas de la fig 12 indican que la tendencia a la volcadura de un vehículo pesado disminuye en la medida en que se incrementa la rigidez de sus suspensiones. Sin embargo, en estos resultados se observa que la sensibilidad de la reducción de la tendencia a la volcadura con el incremento en la rigidez de la suspensión, disminuye para valores altos de la rigidez considerada.

Dichos valores son aproximados a los equipos que actualmente son operados en las carreteras nacionales, de tal suerte que la menor rigidez corresponde, de manera aproximada, a la rigidez de una suspensión de aire. Los valores más altos corresponden a los de una suspensión de hojas.

Es importante destacar la tendencia general de emplear suspensiones de aire en vez de las compuestas de hojas o soleras (llamadas "mecánicas"). Esta tendencia se deriva de la mayor suavidad de marcha provista por una suspensión de aire al compararla con una suspensión mecánica. Adicionalmente, este tipo de suspensiones resultan "amigables" hacia el pavimento, de tal suerte que los vehículos equipados con tales suspensiones estarían provocando un menor daño sobre el pavimento.

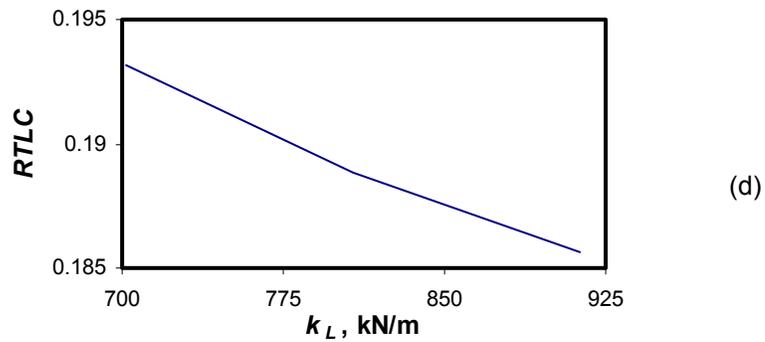
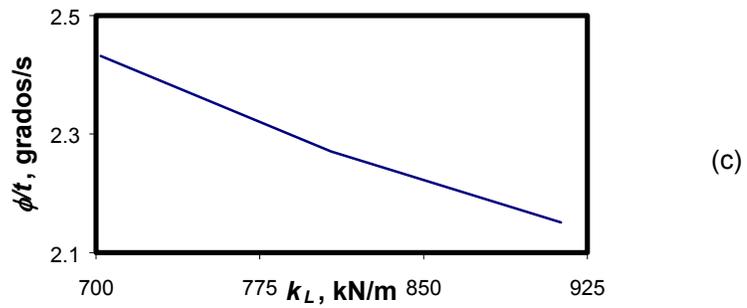
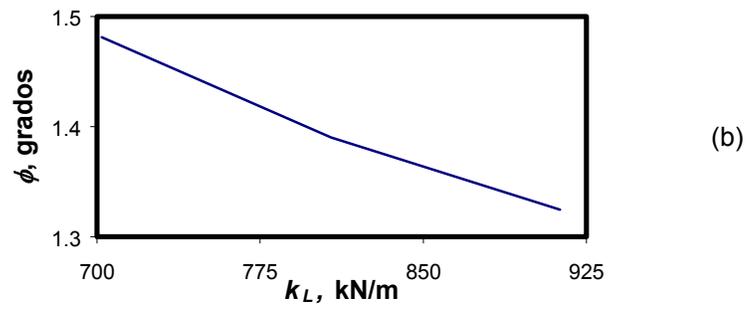
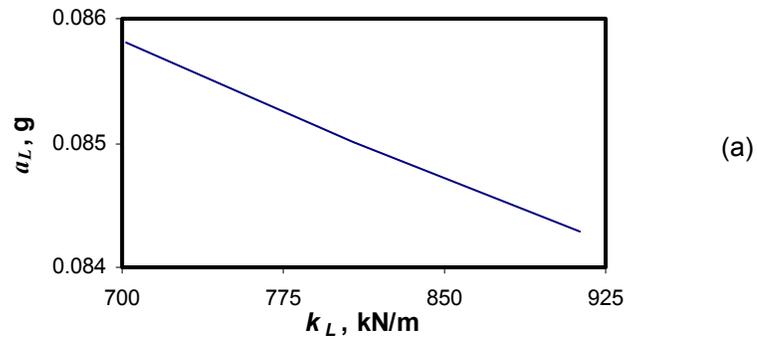


Fig 11. Efecto de la variación de la rigidez vertical de las llantas sobre las variables de la tendencia a la volcadura del vehículo ensayado

Esta percepción es de tal manera aceptada que los reglamentos dan una tolerancia para los ejes equipados con suspensión de aire, permitiéndoles un sobrepeso que resulta ser de un 10% aproximadamente, con respecto a las suspensiones mecánicas. Debe señalarse que existen reportes que indican que una suspensión de aire cuyos amortiguadores estén defectuosos, podría ser aún más perjudicial para el pavimento que una suspensión mecánica (Cebon, 1999). De esta manera, se requiere una evaluación adicional en el contexto de la caracterización del efecto de la rigidez de las suspensiones en la propensión a la volcadura. Esto es, se requiere evaluar tal tendencia al estar equipados con suspensiones suaves y amortiguadores defectuosos, o de baja constante de amortiguamiento.

2.1.10 Evaluaciones comparativas empleando combinaciones mejoradas de los parámetros

Las diferentes características paramétricas de los vehículos se tratan en esta sección con la finalidad de estimar los niveles de mejoramiento posibles mediante la consideración de los valores mejorados para los distintos parámetros. Este proceso se ha efectuado en dos partes; por un lado, se han considerado los valores mejorados de los parámetros geométricos (OPTIMOGEO), de entre aquellos considerados en las simulaciones presentadas. Por otro lado se evalúa el efecto de los parámetros globales mejorados, incluyendo la rigidez de las llantas y de las suspensiones (ÓPTIMO).

La fig 13 contiene los valores máximos de las cuatro medidas de desempeño consideradas, al efectuar la misma maniobra de cambio de carril de las simulaciones anteriores. Estos resultados muestran un efecto importante de los valores mejorados de los parámetros sobre la tendencia a la volcadura, la cual se reduce de manera drástica al considerar todos los parámetros mejorados, en tanto que son relativamente pequeños los mejoramientos asociados a la inclusión de una mejor rigidez para las llantas y suspensiones. Los porcentajes de reducción asociada a los distintos criterios de mejoramiento de las características del vehículo, con respecto a la configuración normal de vehículo, se muestran en la fig 14.

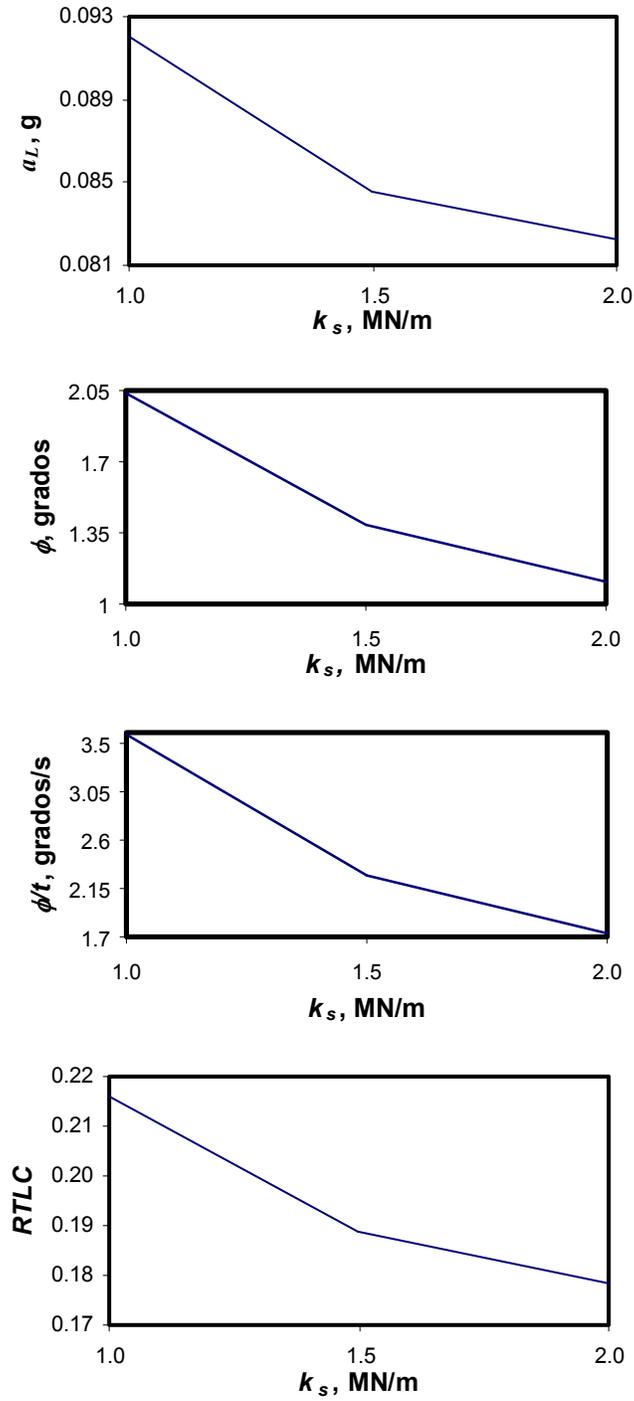


Fig 12. Efecto de la variación de la rigidez de la suspensión sobre las variables de la tendencia a la volcadura del vehículo ensayado

Los resultados de la fig 14 indican que mediante la incorporación de mejores parámetros, tanto geométricos como de rigidez, se pueden obtener reducciones incluso mayores del 50% para algunas variables de desempeño (ángulo ϕ y velocidad angular $\dot{\phi}$), con un mejoramiento de al menos el 6% en el caso de la aceleración lateral. En contraste con esta mejora global, un acrecentamiento constreñido a las características geométricas implica un mejoramiento ligeramente menor.

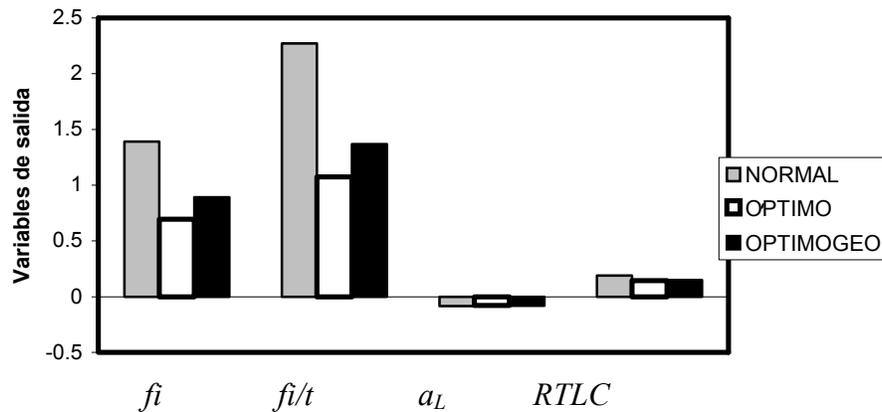


Fig 13. Resultados al considerar distintos niveles de mejoramiento de las propiedades del vehículo (ÓPTIMO incluye parámetros geométricos y de rigidez mejorados; OPTIMOGEO representa los resultados que incluyen sólo un mejoramiento de los parámetros geométricos)

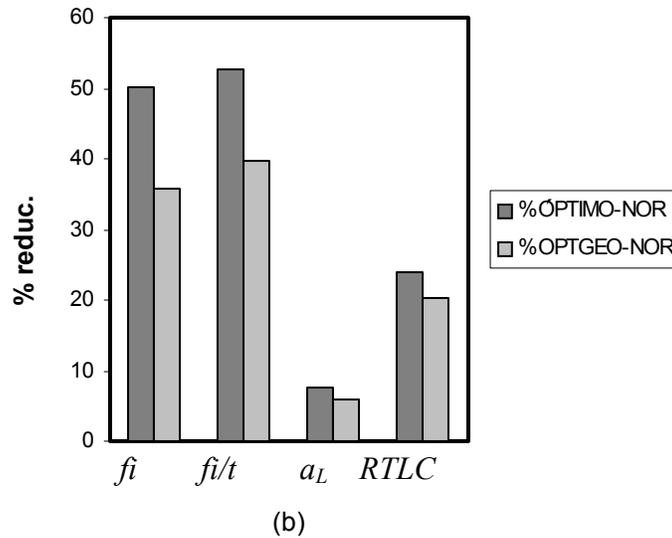


Fig 14 Porcentajes de mejora en la estabilidad lateral del vehículo como una función de los niveles de mejoramiento: geométrico únicamente (OPTGEO-NOR), y ÓPTIMO, que incluye características geométricas y de rigidez

2.2 Análisis de sensibilidad paramétrica

Con objeto de determinar la importancia de efectuar cambios potenciales en las configuraciones y características de los vehículos, se presenta un análisis de sensibilidad de las distintas medidas de desempeño a los diversos parámetros.

La sensibilidad de las diferentes medidas de desempeño consideradas, se evalúa mediante la relación de los incrementos relativos obtenidos en las variables de desempeño, divididos por los incrementos relativos de los parámetros argumentados; la ec 2 expresa esta relación, donde n es el número de diversidad en las variables de salida y los parámetros de entrada. En particular, los resultados en este trabajo consistieron de tres conclusiones, por lo que el número de intervalos de variación, n , es igual a dos.

$$S = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{(m_{k+1} - m_k) / m_k}{(p_{k+1} - p_k) / p_k}}{n} \quad (2)$$

Los resultados en la fig 15 muestran valores negativos y positivos para la sensibilidad S , de acuerdo con el efecto general de los distintos parámetros

considerados. Mientras que la velocidad del vehículo y la posición del centro de gravedad representan incrementos positivos en las medidas de desempeño, los otros parámetros significan disminuciones en los valores de las variables de salida. Estos resultados muestran que la magnitud de esta sensibilidad S es una función de la medida de desempeño considerada. Mientras que la sensibilidad al parámetro H es de casi tres en el caso de la velocidad angular ($\dot{\phi}$); para la aceleración angular, esta sensibilidad es menor de 0.5. De acuerdo con las conclusiones de la gráfica (a) de la fig 15, un aumento del 1% en la velocidad produce un incremento en la aceleración lateral máxima del 1.93%; un aumento del 1% en el semiespaciamiento entre muelles conduce a un decremento de 0.31% en la aceleración lateral máxima. Por otro lado, una ampliación del 1% en la rigidez de las llantas provoca un decremento del 0.06% en la aceleración máxima, y un incremento del 1% en la altura del centro de gravedad del vehículo, genera un crecimiento del 0.5% en la aceleración máxima. Asimismo, un aumento del 1% en la semiseparación entre llantas, conduce a un incremento marginal del 0.08% en la aceleración máxima. Finalmente, para la gráfica (a), una ampliación del 1% en la rigidez de la suspensión conlleva a un decremento de un 0.12% en la aceleración lateral máxima.

Con objeto de facilitar la identificación de los parámetros que de manera más importante afectan las distintas medidas de desempeño consideradas, la tabla 2 muestra en orden de importancia los distintos parámetros. Con el propósito de discriminar entre condiciones de operación y los parámetros geométricos y de rigidez del vehículo, la parte (a) de la tabla incluye la velocidad del vehículo. En el caso de la parte (a), la velocidad y la posición del centro de gravedad del vehículo quedan dentro de los dos primeros lugares de importancia. Como parámetro de menor importancia queda la rigidez de las llantas. En la parte (b) se ilustra, como elemento de tercer nivel de importancia, la rigidez de las llantas en general excepto para la Relación de Transferencia Lateral de Carga, $RTLC$. De esta manera, los tres parámetros más importantes para el $RTLC$ son geométricos, mientras que para las otras medidas de desempeño, los tres parámetros más importantes son H , L y k_s .

Estos distintos niveles de tendencia a la volcadura, revelados por las diversas medidas de desempeño consideradas, se atribuyen a la interacción entre las diferentes masas del vehículo ensayado. Esto es, existe un desfase entre las vibraciones de las masas, lo cual provoca que los valores más elevados de las medidas de desempeño, ocurran en distintos momentos. Un análisis en el dominio del tiempo podría revelar este tipo de resultados.

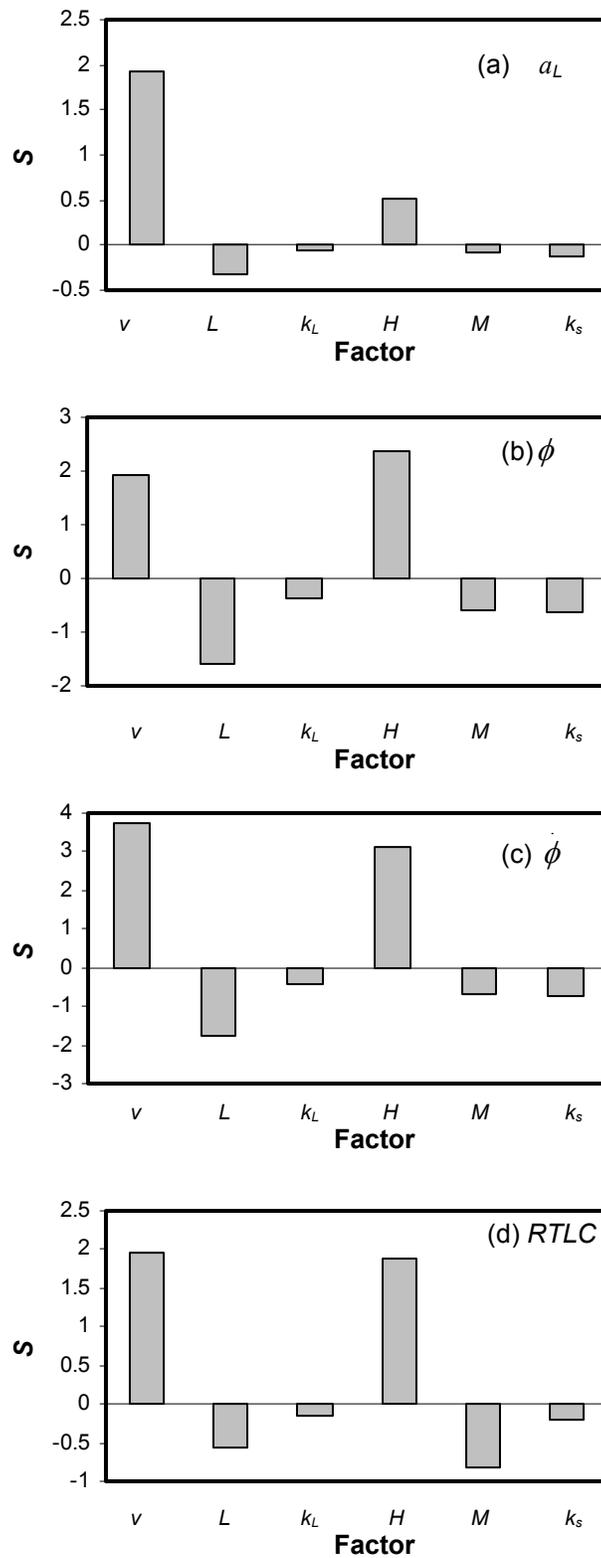


Fig 15. Sensibilidad S de las medidas de desempeño a los cambios en los parámetros considerados

Tabla 2. Orden de sensibilidad a las distintas medidas de desempeño, (a) considerando el factor velocidad; (b) sin considerar la velocidad

(a)

	1	2	3	4	5	6
a_L	H	v	L	k_s	M	k_L
ϕ	v	H	L	k_s	M	k_L
$\dot{\phi}$	v	H	L	k_s	M	k_L
$RTLC$	v	H	M	L	k_s	k_L

(b)

	1	2	3	4	5
$a_L, \phi, \dot{\phi}$	H	L	k_s	M	k_L
$RTLC$	H	M	L	k_s	k_L

Capítulo 3

Revisión de la normatividad acerca de los dispositivos de protección ante volcaduras

Se presenta una revisión de la literatura relacionada con la normatividad para el diseño y configuración de los dispositivos de protección ante volcaduras. Incluye tanto normas nacionales como estadounidenses.

3.1 Regulaciones nacionales

El autotransporte para sustancias peligrosas está regido en México por leyes, reglamentos y Normas Oficiales Mexicanas. El documento legal más generalizado en el país es la Ley de Vías Generales de Comunicación, siendo los reglamentos correspondientes el Reglamento de Autotransporte Federal y Servicios Auxiliares (RAFSA), y el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (RTTMRP). Asimismo, varias Normas Oficiales Mexicanas (NOM, obligatorias), han sido creadas en relación al transporte carretero de sustancias peligrosas.

Ley de Vías Generales de Comunicación (LVGC)

La componen distintos libros, que a su vez contienen títulos de los cuales se derivan los diversos capítulos que dan lugar a los diferentes artículos, los cuales se enumeran de manera única y en forma consecutiva. Los libros de esta Ley contemplan los principios generales y los diversos tipos de comunicación (terrestre, por agua, aeronáutica y eléctrica). Ha tenido numerosos cambios en años recientes, con lo que muchos de sus Libros han sido derogados para dar paso a nuevas Leyes y Reglamentos. De esta forma, los artículos vigentes consideran los aspectos generales de las comunicaciones. Los otros aspectos de esta regulación transfieren la normatividad de los distintos modos de transporte a leyes particulares.

De acuerdo con el Artículo 3° de la LVGC, el Poder Ejecutivo, a través de la SCT tiene facultad para vigilar, verificar e inspeccionar lo relativo a los aspectos técnicos y normativos de los modos de transporte. El Artículo 1° de la LVGC hace referencia, para propósitos de regulación, a la Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal (diciembre, 1993). En particular, el Artículo 71 de la LVGC señala que son responsabilidad del transportista las pérdidas o averías que sufran los efectos que transportan, eximiendo a los proveedores de la infraestructura de responsabilidad alguna en el caso de sustancias peligrosas.

Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal (LCPAF)

Tiene por objeto regular la construcción, operación, explotación, conservación y mantenimiento de los caminos y puentes que constituyan vías generales de comunicación. Asimismo, regular los servicios de autotransporte federal que operen en estas vías, así como sus servicios auxiliares. La LCPAF regula la planeación y construcción de caminos y puentes, y establece la vigilancia para que se cumpla con los distintos aspectos normativos del autotransporte federal. La Ley de Caminos, Puentes y de Autotransporte Federal se compone de 8 Títulos y 77 Artículos:

- Título I Del régimen administrativo de los caminos, puentes y autotransporte federal
- Título II De la construcción, conservación y explotación de los caminos y puentes
- Título III Autotransporte federal. Disposiciones generales
- Título IV Clasificación de los servicios auxiliares
- Título V Del autotransporte internacional de pasajeros, turismo y carga
- Título VI De la responsabilidad en el autotransporte de carga
- Título VII Inspección, verificación y vigilancia
- Título VIII De las sanciones

La LCPAF estipula que una Norma Oficial Mexicana debe regir cada uno de los tres tipos de vehículos de autotransporte (carga, pasaje y turismo), que transiten en caminos y puentes de jurisdicción federal. Establece los lineamientos para otorgar permisos de autotransporte de carga, y regula los titulares de estos permisos en cuanto al autotransporte de cualquier tipo de bienes en todos los caminos de jurisdicción federal, regulando el transporte de **materiales, residuos, remanentes y desechos peligrosos que circulen en las vías generales de comunicación** (Artículo 50). De manera implícita, esta Ley establece la creación de diferentes reglamentos, incluyendo el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligros.

Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligros (RTTMRP)

La tabla 3 ilustra el contenido del RTTMRP. En ella puede deducirse la naturaleza general de este Reglamento, al incluir aspectos que van desde la clasificación de los materiales peligrosos, hasta las sanciones impuestas a los transportistas. Comprende nueve Títulos, de los que se desprenden diversos capítulos, totalizando 136 Artículos. Asimismo, en su redacción se identifican ligas importantes con distintos elementos de la sociedad, incluyendo las industrias nuclear y de explosivos, los organismos de protección al ambiente y equilibrio ecológico, y las instituciones de salud y salvaguarda nacionales (ejército), El Artículo 114 de este Reglamento, especifica, que los envases y

embalajes para materiales peligrosos deberán cumplir con las normas aplicables. Los Artículos 125 y 126 atienden los aspectos administrativos relativos a la construcción y reconstrucción de unidades de arrastre, haciendo referencia también a las normatividades respectivas, las cuales contemplan los distintos aspectos de seguridad y diseño de los equipos para el transporte de materiales y residuos peligrosos.

Tabla 3. Títulos y capítulos del RTTMRP

T-I Disposiciones generales
Capítulo I. Clasificación de las sustancias peligrosas
T-II Envase y embalaje
Capítulo I. Características
Capítulo II. Etiquetado y marcado del envase y embalaje
T-III Características, especificaciones y equipamiento de los vehículos motrices y unidades de arrastre a utilizar
Capítulo I. Características y especificaciones
Capítulo II. Identificación de las unidades
T-IV Condiciones de seguridad
Capítulo I. Inspección de las unidades
Capítulo II. Acondicionamiento de la carga
Capítulo III. Documentación
Capítulo IV. Sistema nacional de emergencia en transportación de materiales y residuos peligrosos
T-V Tránsito en vías de jurisdicción federal
Capítulo I. Autotransporte del ferrocarril
T-VI Residuos peligrosos
Capítulo I. Disposiciones especiales para el transporte de residuos peligrosos
T-VII Responsabilidad
Capítulo I. Autotransporte y del ferrocarril
T-VIII Obligaciones específicas
Capítulo I. Expedidor y destinatario del material y residuo peligroso
Capítulo II. Autotransporte
Capítulo III. Ferrocarril
Capítulo IV. Capacitación
T-IX Sanciones

Normas Oficiales Mexicanas

Veintiún Normas obligatorias mexicanas, conocidas como Normas Oficiales Mexicanas, regulan los diferentes aspectos relacionados con el transporte de sustancias y residuos peligrosos. Estos aspectos incluyen desde la clasificación de materiales y residuos peligrosos (NOM-002-SCT-1994), hasta los criterios a ser aplicados para la construcción y reconstrucción de los toneles montados sobre chasis (no articulados), así como los remolques tipo tanque (NOM-024-SCT2-1994). En particular, la Norma NOM-020-SCT2/1995 se refiere a los requerimientos para diseño y construcción de los autotanques destinados a la transportación de materiales y residuos peligrosos. Incluye las especificaciones SCT306, SCT307 y SCT312, las cuales se refieren a:

- Autotanques no presurizados – SCT-306
- Autotanques para el transporte de químicos a baja presión – SCT-307
- Autotanques para materiales corrosivos – SCT-312

En este contexto, los tanques “no presurizados” quedan sometidos a la presión de vapor del líquido transportado (hasta 20.73 kPa). Esa presión corresponde a los líquidos más volátiles transportados, esto es, inflamables y combustibles. Tal clasificación en inflamables y en combustibles, corresponde a la temperatura a la cual emiten vapores inflamables (Noll, 1987).

La especificación SCT 307 se refiere a presiones entre 171.6 y 344.22 kPa, mientras que la SCT-312 requiere una sobrepresión de 102.97 kPa para desalojar el líquido transportado.

Un aspecto interesante, relativo a estas diferentes especificaciones, consiste en la forma que deben tener las secciones transversales de los distintos toneles. Mientras que la SCT-306 permite formas diferentes a la circular; la SCT-307 hace obligatorio el uso de secciones circulares. Lo anterior se debe a la desigualdad de las características de resistencia, asociada a distintas áreas de presión vertical y horizontal. En este trabajo, se consideran autotanques no presurizados, que corresponderían a la especificación SCT-306.

Especificaciones nacionales para los dispositivos de protección ante volcaduras

Las características estipuladas en la normatividad nacional por cuanto a las protecciones ante volcaduras (NOM-020-SCT2/1995), consisten en la resistencia de estos equipos frente a diferentes fuerzas aplicadas (Apartado 5.1.6.c). Verticalmente, se especifica que estos dispositivos deben resistir el doble del peso del tanque cargado. Horizontalmente, se especifica una carga horizontal en cualquier dirección, equivalente a la mitad del peso del tanque cargado. Asimismo, se establece que este diseño de cargas puede considerarse independientemente.

Como es posible observar, esta Norma carece de cualesquiera elementos que limiten o restrinjan las características geométricas de los dispositivos, por tanto, constituye una Norma de desempeño

3.2 Regulaciones estadounidenses

Las normas estadounidenses para transporte de materiales peligrosos están contenidas en el Código de Regulaciones Federales, de acuerdo con el esquema de la fig 16. Como se puede observar en el siguiente recuadro (fig 16), existen especificaciones, las cuales atienden los diferentes materiales transportados y las condiciones de su transporte.

La especificación MC-201 se refiere al transporte de materiales tales como nitroglicerina en forma líquida, y otras sustancias explosivas. En cuanto a los contenedores, se indican materiales tales como hules y otras características conforme el diseño de los contenedores para detonadores.

Como requerimientos generales (178.320), se incluyen las definiciones para todas las especificaciones DOT, incluyendo términos tales como *cargo tank*, *cargo tank motor vehicle*, *cargo tank wall* y *design type*.

Título 49. Transporte de sustancias peligrosas
Subparte J-Especificaciones para los contenedores para la transportación de vehículos automotores.
178.318 Especificación MC-201; contenedores para detonantes y explosivos.
178.320 Requerimientos generales aplicables a todas las especificaciones de vehículos motores tipo autotank DOT.
178.337 Especificación MC-331; vehículos motores tipo tanque para el transporte de gases comprimidos.
178.338 Especificación MC-338; vehículos motores tipo tanque aislados térmicamente.
178.345 Requerimientos generales de diseño y construcción aplicables a los vehículos motores tipo tanque de especificación DOT-406, DOT-407, y DOT-412.
178.346 Especificación DOT-406; vehículos motores tipo autotank.
178.347 Especificación DOT-407; vehículos motores tipo autotank.
178.348 Especificación DOT-412; vehículos motores tipo autotank.

Fig 16. **Arreglo de la normatividad estadounidense relativa a las características de los toneles de los autotankes**

La especificación MC-331 se refiere al transporte de gases a alta presión (0.691157 a 3.456 MPa). En general, los lineamientos para el diseño de estos tanques obedecen o siguen el Código ASME para recipientes a presión, con características especiales en cuanto a algunos dispositivos y líquidos transportados (válvulas de alivio y nivel de radiografiado en el caso del transporte de cloro). Para esta especificación, el código señala que las válvulas deberán quedar protegidas ante volcaduras, señalando que tales protecciones deberán resistir una carga, en cualquier dirección, igual al doble del peso del tanque cargado, usando un factor de seguridad no menor de cuatro con respecto a la resistencia última del material usado (estipulando espesores de material de al menos 4.76 mm).

La especificación MC-338 corresponde al cumplimiento del código ASME para recipientes aislados térmicamente. De manera semejante a la especificación MC-331, establece que los dispositivos de protección ante volcaduras deberán resistir una carga, en cualquier dirección, igual al doble del peso del tanque cargado, usando un factor de seguridad no menor de cuatro con respecto a la resistencia última del material empleado (con espesores de material, de al menos, 4.76 mm).

El apartado 178.345 establece los requerimientos generales para diseño y construcción de las especificaciones DOT-406, DOT-407 y DOT-412. En estas disposiciones generales, se incluyen definiciones complementarias a las del apartado 178.320. Los apartados de estos requerimientos generales son como sigue:

- 178.345-1 Requerimientos generales (definiciones).
- 178.345-2 Materiales y espesor de material (aleaciones ASTM, espesores mínimos y sobrespesores por corrosión).
- 178.345-3 Integridad estructural (Código ASME, Sección 8, División 1; cargas dinámicas; esfuerzos cortantes; espesores mínimos).
- 178.345-4 Uniones (Código ASME para uniones soldadas).
- 178.345-5 Entradas hombre (presión mínima 248.82 kPa; placas de certificación).
- 178.345-6 Soportes y anclajes (esfuerzos de diseño, inmovilidad y accesibilidad).
- 178.345-7 Refuerzos circunferenciales (Código ASME, sección 8, División 1).
- 178.345-8 Protecciones contra accidentes (alcances, volcaduras e impactos laterales)
- 178.345-9 Bombas, tuberías, mangueras y conexiones (conectores para carga y descarga)
- 178.345-10 Alivio de presión (capacidad de venteo, ajustes y certificación)
- 178.345-11 Salidas del tanque (otras salidas y sus características)
- 178.345-12 Dispositivos de medición (nivel de llenado)
- 178.345-13 Pruebas de presión y fugas (métodos y presiones de prueba)
- 178.345-14 Etiquetado (placas de datos)
- 178.345-15 Certificación (ingeniero de certificación del diseño)

Protecciones ante volcaduras

Como se señaló en el listado anterior (apartado 178.345-8 del Código de Materiales Peligrosos), existen requerimientos relativos a la protección del autotanke durante accidentes, para evitar el daño a componentes vitales incluyendo tuberías y conexiones, así como los registros de acceso y válvulas diversas. Las situaciones de accidentes se refieren a los alcances y volcaduras. En particular, en cuanto a volcaduras, en el apartado 178.345-8 (c) (1) se establece que:

“Una protección de daño por volcadura montada en un autotanke, debe estar diseñada e instalada para soportar cargas iguales a dos veces el peso del autotanke cargado, aplicadas de la siguiente manera: en forma normal al cuerpo del tanque; y en forma tangencial en cualquier dirección. Los esfuerzos no deberán exceder la resistencia última del material del tanque. Estas cargas de diseño deben estar consideradas como distribuidas uniformemente y aplicadas en forma independiente. Si se usa más de una protección para volcaduras, cada una de ellas debe ser capaz de resistir su parte proporcional de la carga requerida y, en cada caso, al menos una cuarta parte de la carga tangencial. Debe comprobarse que el diseño tenga la capacidad de resistir las cargas requeridas, ya sea mediante cálculos, pruebas o una combinación de pruebas y cálculos”.

Esta especificación establece también que el dispositivo de protección ante volcaduras deberá estar provisto de un dren, para evitar cualquier acumulación de líquido en ella. En correspondencia con la normatividad mexicana (especificaciones SCT-306, SCT-307 y SCT-312), las DOT-406, DOT-407 y DOT-412 se refieren a lo siguiente:

- Autotanques no presurizados – DOT-406 (18.3 a 27.6 kPa)
- Autotanques para el transporte de químicos a baja presión – DOT-407 (172 a 344.2 kPa).
- Autotanques para materiales corrosivos – DOT-412 (presión mínima mayor de 103.7 kPa).

Es importante señalar que tanto los requerimientos generales como las especificaciones mismas (DOT-406, DOT-407 y DOT-412), sustituyeron desde 1989 las especificaciones MC306, MC307 y MC312, respectivamente. Estos cambios se dieron como resultado de numerosas enmiendas propuestas en ese entonces, con objeto de incrementar la seguridad del transporte (NTSB, 1992). Las siglas DOT corresponden a la designación *Department of Transportation*, mientras que las siglas MC corresponden a la denominación *Motor Carriers*

3.3 Análisis comparativo de los requerimientos normativos de Estados Unidos (DOT) con los de México (SCT)

La diferencia entre las normatividades mexicanas y estadounidenses consiste en la resistencia a las cargas horizontales. Mientras que los requerimientos generales de la Norma NOM-020 especifican, para definir la resistencia en la dirección horizontal, una resistencia necesaria de 0.5 veces el peso del vehículo cargado, en los requerimientos generales de la Norma Estadounidense (178.345), dicha capacidad de carga se establece de dos veces el peso del vehículo cargado. La capacidad de carga en dirección vertical es la misma para ambas; esto es, dos veces el peso del vehículo cargado.

La tabla 4 ilustra las diferencias en cada uno de los apartados de ambas normas (DOT y SCT), con respecto a los requerimientos generales para las especificaciones de autotankes considerados en este trabajo. De la tabla se puede establecer que la normatividad mexicana toma gran número de los elementos proporcionados por la normatividad estadounidense (DOT) careciendo sin embargo, de muchas de las especificaciones de la Norma DOT.

En particular, se identifican algunas inconsistencias en la normatividad nacional, como la referente a que esta Norma requiere que se efectúen ambas pruebas (hidrostática y neumática) (5.1.8(a)), lo cual resulta incongruente con el apartado 5.1.8(a)(2), que indica que la prueba neumática es equivalente a la hidrostática.

Otra característica de la Norma SCT es que sólo hace referencia al Código ASME en el apartado referente a la especificación de materiales, siendo que tal Código es referenciado por la Norma DOT a lo largo de todo su contenido. Se puede observar que en la Norma SCT se trata de evitar la referencia al Código ASME, al incluir las fórmulas y valores de dicho Código.

Tabla 4. Listado de diferencias entre la normatividad DOT y la SCT *

DOT	SCT	Observaciones
178.320(a); 178.345-1(c)	4	Definiciones. SCT no define algunos términos empleados, tal como la Presión de Trabajo Máxima Autorizada
178.345-1(i)(1)	5.1(c)(1)	Mismo contenido
178.345-1(i)(2)	5.1(c)(2)	Mismo contenido
178.345-2(a)	5.1.1(a)	Mismo contenido
178.345-2(a)(2)	5.1.1(a)(1)	Mismo contenido
178.345-2(a)(1)	5.1.1(a)(2)	En DOT se especifican materiales ASTM, en la SCT se proporciona una tabla con las propiedades mínimas de resistencia
178.345-2(b), (c)(1),(c)(2)	NA	Se refiere a sobrespesores por corrosión, revestimientos y espesores mínimos
178.345-3(a)(1)	5.1.2(a)	En la SCT, no se hace referencia al Código ASME
178.345-3(a)(2),(3),(4); (b)(1)(2);(c)(1)(i),(ii),(iii)(iv);(c)(2);(d);(e),(f)	5.1.2(b)	DOT hace referencia al Código ASME. Aparte hace requerimientos específicos por cuanto a concentraciones de esfuerzo, sobre espesores por corrosión, cargas normales y dinámicas extremas, esfuerzos cortantes y flexionantes. En la NOM sólo indica características generales, sin aportar valores ni fórmulas ni referencias para cálculo.
178.345-4(a)	5.1.3(a),(b) (c),(d)	DOT hace referencia al Código ASME para la soldadura. En SCT se dan instrucciones generales para la soldadura de los diferentes materiales (aluminio y acero).
178.345-4(b)	NA	DOT hace referencia a la accesibilidad a las soldaduras
178.345-5	NA	Entradas de hombre
178.345-6(a)	5.1.4(a)	DOT señala los cálculos de esfuerzos según 178.345-3. La SCT indica cualitativamente los requerimientos.
178.345-6(b)	5.1.4(b)	DOT señala esfuerzos según 178.345-3. La SCT hace ref a 5.1.2(a)
178.345-7(a)	5.1.5(a)	Mismo contenido
178.345-7(a)(1)	5.1.5(a)(1)	DOT hace referencia al código ASME. La SCT da detalles.
178.345-7(a)(2)	NA	DOT especifica los refuerzos en secciones cónicas.
178.345-7(b)	NA	Especificaciones para los refuerzos en uniones circunferenciales
178.345-7(c)	5.1.5(b)	Mismo contenido
178.345-7(d)	5.1.5(d)	Mismo contenido
178.345-7(d)(1)	5.1.5(d)	Mismo contenido
178.345-7(d)(2)	5.1.5(d)(1)	Mismo contenido

* NA: no aplicable

Tabla 4 (Cont). Listado de diferencias entre la normatividad DOT y la SCT *

DOT	SCT	Observaciones
178.345-7(d)(3)	NA	DOT hace referencia a situaciones con vacío
178.345-7(d)(4)	5.1.5(d)(2)	Mismo contenido
178.345-7(d)(5)	NA	Se refiere a los anillos tipo de sección en canal, o "sombrero"
178.345-8(a),(b),(d),(e)	5.1.6(a),(b)	DOT incluye más especificaciones. SCT también se toman de manera diferente.
178.345-8(c)	5.1.6(c)	DOT menciona posiciones y resistencias
178.345-8(c)(1)	5.1.6(c)(1)	Protección contra volcaduras. DOT especifica 2 veces el peso en caso de carga horizontal, mientras que SCT especifica 0.5 veces el peso del tanque.
178.345-8(c)(2)	5.1.6(c)(3)	Mismo contenido
NA	5.1.6(c)(2)	SCT especifica excepciones a la instalación de protecciones contra volcadura.
178.345-8(b)(2)	5.1.6(d)(1)(i)	Mismo contenido
NA	5.1.6(d)(1)(ii)	Se especifican 3,600 kg de resistencia para las tuberías de descarga
178.345-9(b),(c)(d)	NA	Detalles de las conexiones y tuberías
178.345-9(a)	5.1.7	Mismo contenido
178.345-10	NA	Se refiere a los dispositivos de alivio de presión
178.345-11	NA	Se refiere a las salidas de carga/descarga
178.345-12	NA	Se refiere a los medidores de nivel
178.345-13(a)	NA	General
178.345-13(b)	5.1.8(a)	SCT refiere a prueba hidrostática y neumática, DOT es una u otra.
178.345-13(b)(1)	5.1.8(a)(1)	Mismo contenido
178.345-13(b)(2)	5.1.8(a)(2)	SCT y DOT señalan que esta prueba es equivalente a la hidrostática. SCT resulta contradictorio.
178.345-13(c)	5.1.8(b)	Mismo contenido
178.345-13(d)	5.1.8(c)	Mismo contenido
178.345-14	5.1.9(a)(b)	Placa de identificación (<i>nameplate</i>). En SCT se incluye en Certificación 5.1.9. SCT no se pide placa de identificación inoxidable.
178.345-15	5.1.9(c)	Certificación. DOT hace referencia al Código ASME. DOT hace referencia a la reparación

* NA: no aplicable

3.4 Discusión

Las normas no especifican muchas de las características que serían necesarias para el diseño de las protecciones ante volcaduras, de acuerdo con la siguiente lista de omisiones:

- I. Las normas no establecen ninguna característica dimensional o geométrica para esos dispositivos. Al respecto, estas especificaciones son proporcionadas para el caso de otros dispositivos de protección ante accidentes (defensas traseras). En el caso de las defensas traseras, las normas revisadas establecen una tolerancia entre esos elementos y el tanque, con objeto de absorber la deformación asociada a algún impacto sobre la parte trasera del vehículo.
- II. Los valores requeridos de resistencia de estos elementos de protección ante volcaduras, no parecen provenir de alguna metodología específica, de la forma como se especifican para otros componentes del tonel. En particular para el caso del tonel, la Norma DOT hace referencia al Código ASME, mientras que la Norma SCT trata de incluir tal información en el mismo texto de la Norma.
- III. Las cargas que deben resistir estos elementos de protección se consideran como distribuidas de manera uniforme sobre los artefactos. Tal situación representa una condición de impacto “ideal”, ya que en general los impactos durante una volcadura serán en ángulos oblicuos.

Las características geométricas y dimensionales del apartado (I) anterior, son de gran importancia en el contexto de la protección a los vehículos ante volcaduras. Los diseños para este tipo de elementos de protección, consisten ya sea en dispositivos discretos - colocados alrededor de los registros y domos -, o en elementos continuos a lo largo de la parte superior del tonel. Tales características dimensionales deberían incluir la separación entre estas protecciones y los elementos protegidos; asimismo, el espaciamiento entre la altura de estos dispositivos de protección y la altura de los elementos protegidos.

En estas normatividades no se especifican las limitaciones en el peso de los dispositivos de protección, siendo que, por la posición en que se encuentran tales dispositivos, podrían afectar adversamente la estabilidad lateral de los vehículos.

Diseño conceptual de protecciones ante volcaduras

Se exponen, de manera general algunos elementos de la metodología del diseño en ingeniería, aplicándolos al desarrollo conceptual de un dispositivo de protección ante volcaduras en vehículos tipo autotank. En este contexto, se establecen las necesidades de equipo y se definen los principios de operación de los distintos módulos identificados.

4.1 Metodología del diseño en ingeniería

Existen varias ideas acerca de lo que significa el término “diseño” en ingeniería. De manera común, se refiere al proceso de dimensionamiento y selección de equipo, tal cual se aplica en los cursos de diseño de licenciatura (Diseño de Elementos de Máquinas). Así, como resultado de este proceso, se dimensionan árboles, ejes, etc. Asimismo, se seleccionan rodamientos, engranes, bandas, etc.

En un sentido más amplio, sin embargo, la actividad de diseño en ingeniería implica un proceso creativo y sistemático, cuya finalidad es cambiar el estado de la técnica respecto a los equipos y/o procesos existentes. Dicho concepto se relaciona estrechamente con las actividades de desarrollo de patentes de equipo y procesos. Se considera en el presente capítulo, aplicándolo al diseño conceptual de una protección de vehículos ante volcadura.

Correspondencia entre el proceso de diseño en ingeniería y el método científico

En la fig 17 se ilustra el paralelismo entre el método científico y el proceso de diseño (Dieter, 1986); se puede observar que la etapa de conceptualización de dicho proceso corresponde al planteamiento de la hipótesis del método científico. Esta etapa es la más importante de ambos procesos, dado que en ella se definen, de alguna forma, los alcances de las actividades científicas y de ingeniería.

Atendiendo los efectos que ambos procesos ejercen sobre la sociedad, se puede decir que mientras que el conocimiento científico se incrementa como producto de la investigación científica, en el caso del proceso de diseño en ingeniería lo que se modifica es el estado de la técnica, concepto que abarca todos aquellos equipos y procesos que constituyen el estado tecnológico en determinado momento. Tal estado de la técnica evoluciona muchas veces como resultado de aplicar los nuevos conocimientos generados en la investigación científica.

La correspondencia entre los procesos, científico y de diseño en cuanto a su motivación, representa la diferencia fundamental entre ambos. De esta manera, mientras que la curiosidad científica es el detonador de un proceso de investigación, la definición de ciertas necesidades constituye el elemento de motivación para el diseño en ingeniería. Otra diferencia fundamental entre los dos métodos consiste en que la satisfacción de necesidades se da en un esquema de tiempos de desarrollo rígidos, en tanto que en la investigación científica el tiempo de desarrollo de las investigaciones no es un factor determinante.

Es necesario destacar que en el desarrollo de la conceptualización del diseño es común tener que realizar una multitud de aproximaciones matemáticas, de laboratorio o de campo, las cuales validen los desarrollos conceptuales propuestos. En la validación de los principios de operación propuestos en esta etapa se encuentra implícita la aplicación del método científico. Por otro lado, la característica común de los procesos descritos es que ambos son iterativos.

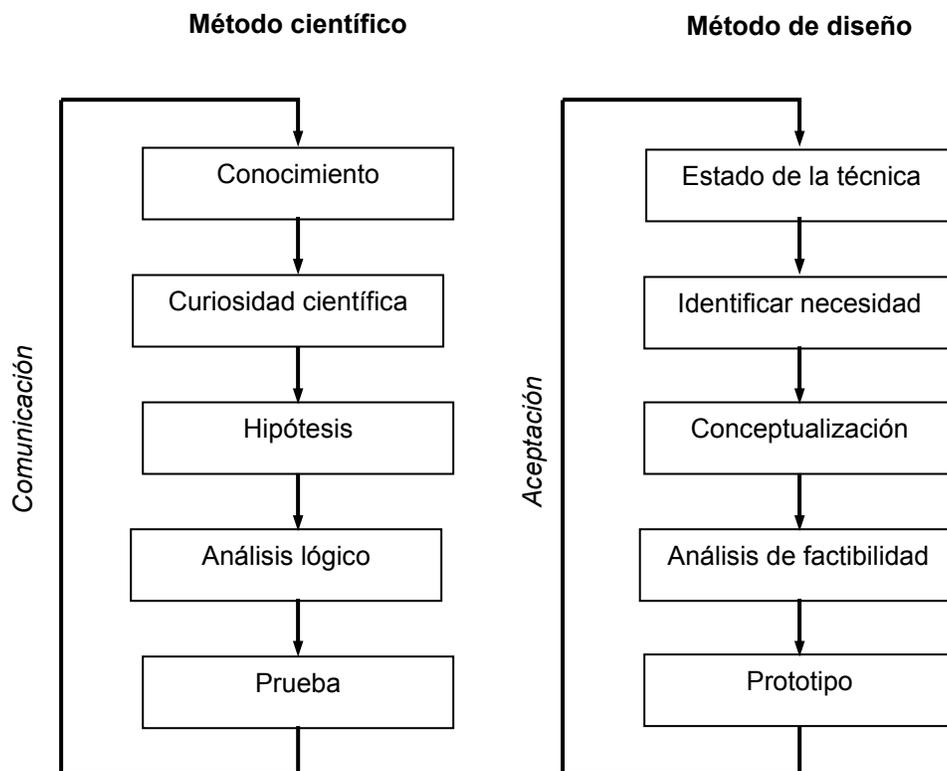


Fig 17. **Comparación entre el método científico y el proceso de diseño (Dieter, 1986)**

De esta manera, como resultado de los procesos, ya sea del método científico o de diseño, siempre habrá posibilidad de “regresarse” a las distintas etapas de los mismos (replanteamiento de las hipótesis, y la reconceptualización).

Pasos en el proceso de diseño

Los seis principales pasos son los siguientes (Dieter, 1986):

- Reconocimiento de una necesidad
- Definición del problema
- Recolección de información
- Conceptualización
- Comunicación del diseño

A continuación se describe brevemente cada uno de los pasos listados:

Reconocimiento de una necesidad

En esta etapa se obtiene la mayor cantidad de características requeridas del producto o proceso nuevo por desarrollar. Su importancia radica en que el cuidado que sea puesto en ella, afectará la satisfacción de las necesidades así definidas.

Como resultado del proceso de reconocimiento y caracterización de las necesidades, se contará con parámetros con los cuales se establezca la medida en que las necesidades se satisfagan. En este proceso se busca definir indicadores objetivamente verificables de la satisfacción.

Los riesgos inherentes a un proceso defectuoso de reconocimiento de necesidades, consisten en malinterpretar las necesidades y emprender satisfactores para necesidades no existentes.

Definición del problema

Consiste en poner en un esquema de ingeniería las necesidades planteadas, procurando ubicarlas en términos de las distintas disciplinas de la ingeniería, planteando entradas, salidas y recursos, así como los enfoques necesarios para solucionar el problema.

Recolección de la información

En esta etapa se debe establecer el estado de la técnica en la que respecta al problema planteado. Las fuentes de información respectivas son de distinta naturaleza, desde observaciones de campo hasta la consulta de acervos especializados (patentes, revistas, normas).

Conceptualización

Se identifican los diferentes módulos ligados al proceso o equipo en desarrollo. Esta modulación incluye la definición de las interacciones entre los distintos módulos definidos.

Los principios de operación de cada uno de los módulos establecidos se definen en esta etapa. Al respecto, la validación de estos principios de operación puede implicar la realización de modelos teóricos y experimentales.

Es importante destacar que en esta etapa se debe divergir por cuanto a las alternativas de los principios de operación, a manera de tener la mayor cantidad de soluciones posibles al problema planteado.

Evaluación

En esta etapa se realiza la prueba del proceso o equipo desarrollado, a nivel prototipo. Se determina en esta etapa, de manera objetiva, el nivel de satisfacción de las necesidades planteadas al principio del proceso.

Es importante señalar que el proceso de diseño es iterativo, de tal suerte que como resultado del proceso de evaluación, se tengan que efectuar cambios en cualquiera de las etapas del proceso de diseño. Esto es, después de realizar la evaluación puede requerirse un replanteamiento, inclusive de las necesidades. Otro “retorno” en el proceso suele darse a nivel de la conceptualización.

Comunicación del diseño

Finalmente, se tiene que dar a conocer el diseño, documentando el proceso desarrollado, desde la definición de las necesidades hasta el producto del mismo.

4.2 Diseño conceptual

Se presenta la aplicación de los primeros elementos de la metodología descrita (hasta la etapa de conceptualización), en el diseño conceptual de un dispositivo para la protección de los autotanques ante volcaduras.

4.2.1 Definición de necesidades

Diferentes reportes sobre seguridad carretera han revelado que las protecciones, actualmente en uso para autotanques ante eventos tipo volcadura, no son lo suficientemente eficaces para cumplir con los fines para las que fueron diseñadas (Winkler, et al., 1998; NTSB, 1992). Estas limitaciones en los diseños actuales se identifican en cuanto a:

Áreas desprotegidas. Los diseños vigentes de los dispositivos no proveen los medios para evitar que las áreas protegidas sean afectadas por cualquier clase de objetos. Esto provoca, eventualmente, que las válvulas y accesorios montados en la parte superior de los autotanques, sean penetrados por piedras u otros elementos que provocan derrames y situaciones de alto riesgo.

Altura insuficiente. Los dispositivos actualmente en uso no proporcionan protección suficiente en todas direcciones, dado que su altura no resulta mayor que la de los equipos protegidos.

Baja capacidad de absorción de energía de impacto. No se considera en los diseños actuales, la capacidad potencial de los dispositivos de protección para absorber parte de la energía cinética asociada a los impactos, que sufre el vehículo durante su volcadura.

De esta manera, se concibe el siguiente planteamiento de las necesidades a ser satisfechas por un diseño conceptual alternativo:

Un dispositivo de protección ante volcaduras, a ser montado en vehículos articulados y no articulados debe responder a que:

- Dé máxima protección por cuanto al área cubierta, sin afectar la operación del equipo protegido
- Proporcione una máxima capacidad de absorción de energía de impacto
- Sea eficiente en relación a su peso
- Minimice el costo de fabricación y de materiales
- Tenga la máxima confiabilidad
- Tenga una máxima capacidad de distribución del impacto sobre el tanque
- Emplee materiales comerciales
- Cuenten con las provisiones para el acceso del operador

Los siguientes apartados continúan el proceso de diseño conceptual del equipo.

4.2.2 Recopilación de información

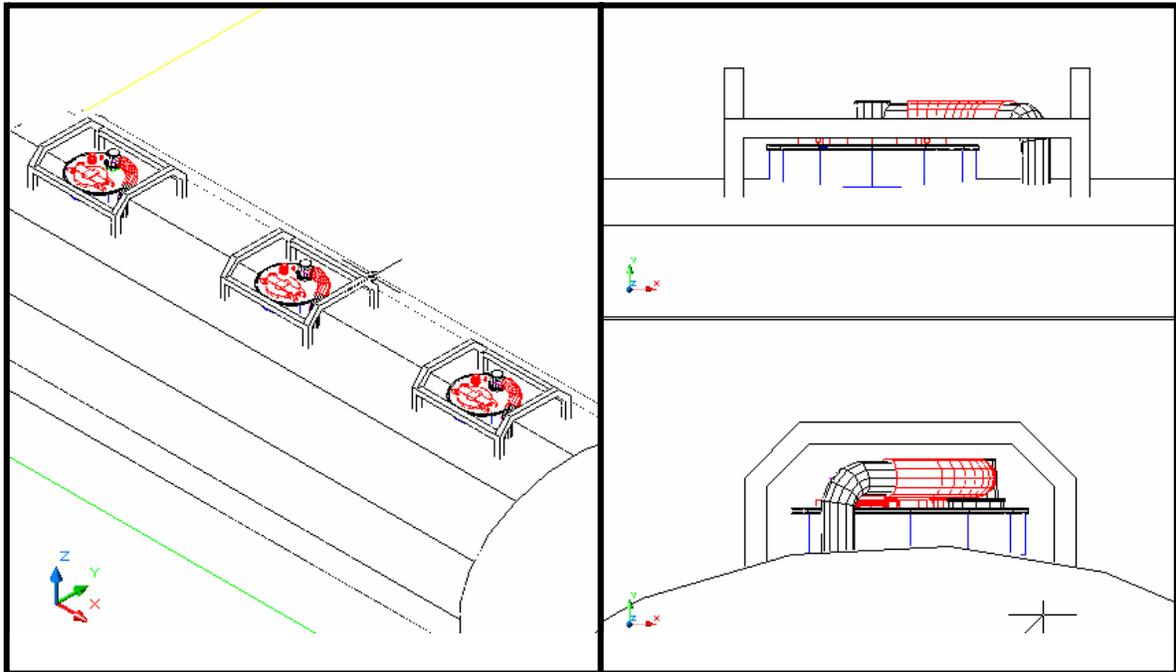
Se presenta una descripción de los diseños en uso para protección ante volcaduras. Al respecto, y por la carencia de requerimientos normativos en cuanto a características dimensionales y geométricas para estos dispositivos (señaladas en la sección anterior) se tiene que se emplea una gran cantidad de diseños variados.

Atendiendo el área que cubren, los dispositivos de protección ante volcaduras se clasifican de la siguiente manera:

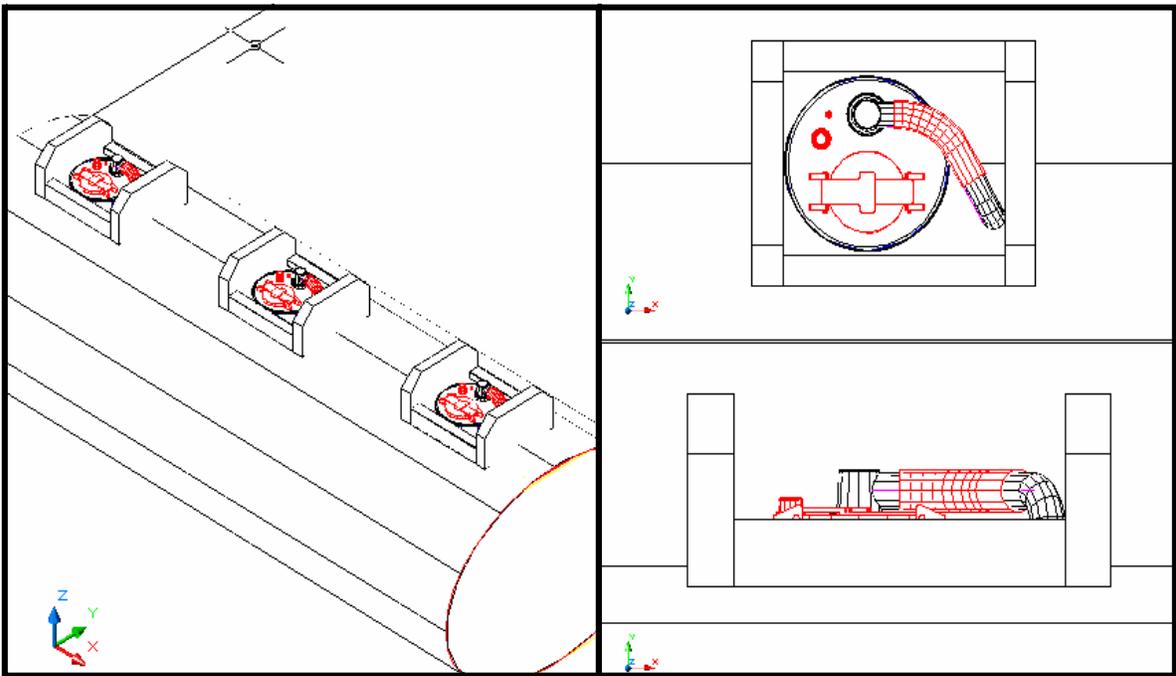
- Discretos
- Continuos

Los modelos discretos, consisten en marcos y ensambles alrededor de los elementos que se desea proteger. Algunas variantes para este tipo de protecciones discretas consisten en el material de fabricación. Esto es, pueden estar hechos de perfiles estructurales, que conforman una pequeña estructura la cual se fija al tanque en la posición de los elementos protegidos. La fig 18(a) es un ejemplo de tales diseños (NTSB, 1992). Las estructuras también pueden estar cubiertas con placa, como se muestra en la fig 18(b). Por otro lado, hay elementos discretos que conforman un marco tubular alrededor de los elementos protegidos, los cuales, en general consisten en dos elementos transversales, altos, de protección, y dos longitudinales de menor altura. Los longitudinales proporcionan una retención para los derrames ocasionales del fluido transportado. La fig 19 ilustra dos arreglos de este tipo. Tales diseños son comunes en tanques montados sobre el chasis, aunque también se incluyen en vehículos articulados (fig 20).

Un diseño relevante de protección discreta se ilustra en la fig 21; corresponde a un vehículo de la NASA (*National Aeronautical and Space Administration*); permite evitar penetraciones de objetos de cualquier tamaño, aparte de presentar la tendencia a distribuir los esfuerzos de los impactos en un área mayor. Sin embargo, la característica de ser una protección cerrada dificulta la inspección y cualesquiera trabajos a ser realizados con relación a los elementos protegidos.

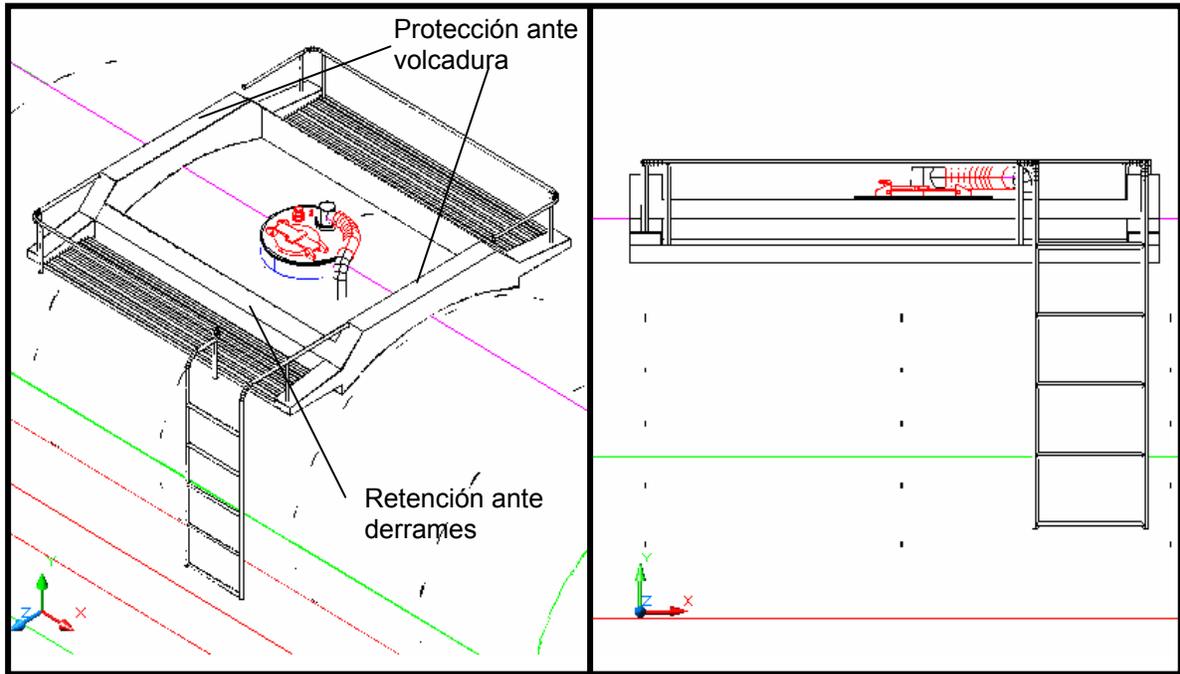


(a)

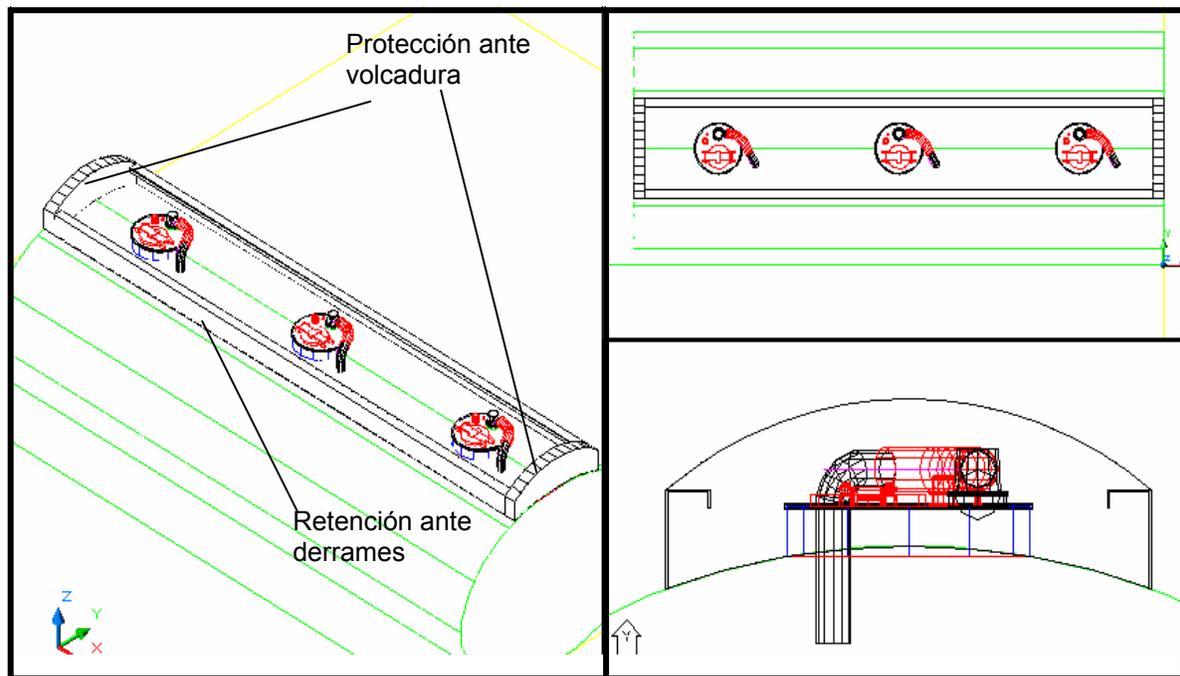


(b)

Fig 18. Protecciones ante volcaduras de diseño discreto, (a) estructural; (b) estructural con placas



(a)



(b)

Fig 19. Diseños de protecciones, (a) discreto; (b) discreto con extremos curvos

La protección ante volcaduras de diseño continuo consiste en elementos longitudinales soldados al tonel, existiendo distintos diseños para la disposición de estos elementos longitudinales. La fig 22 muestra diseños que incluyen: (a) uso de canales triangulares invertidos; (b) diseños de riel con placas de refuerzo; y (c) rieles longitudinales con refuerzos tubulares transversales. Los elementos triangulares invertidos proveen cierta capacidad de absorber energía de impacto, minimizando el peso de estas protecciones. El arreglo con placas de refuerzo proporciona mayor rigidez al conjunto de protección, mientras que los refuerzos tipo cartabón, brindan mayor resistencia tanto en cargas verticales como horizontales.

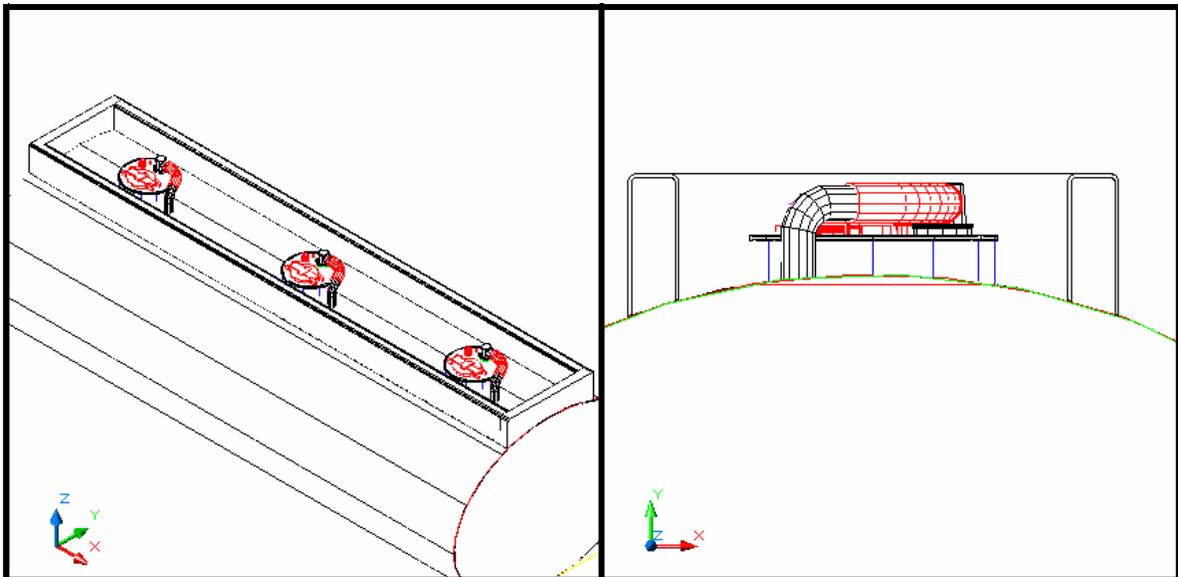


Fig 20. Protección de marco tubular

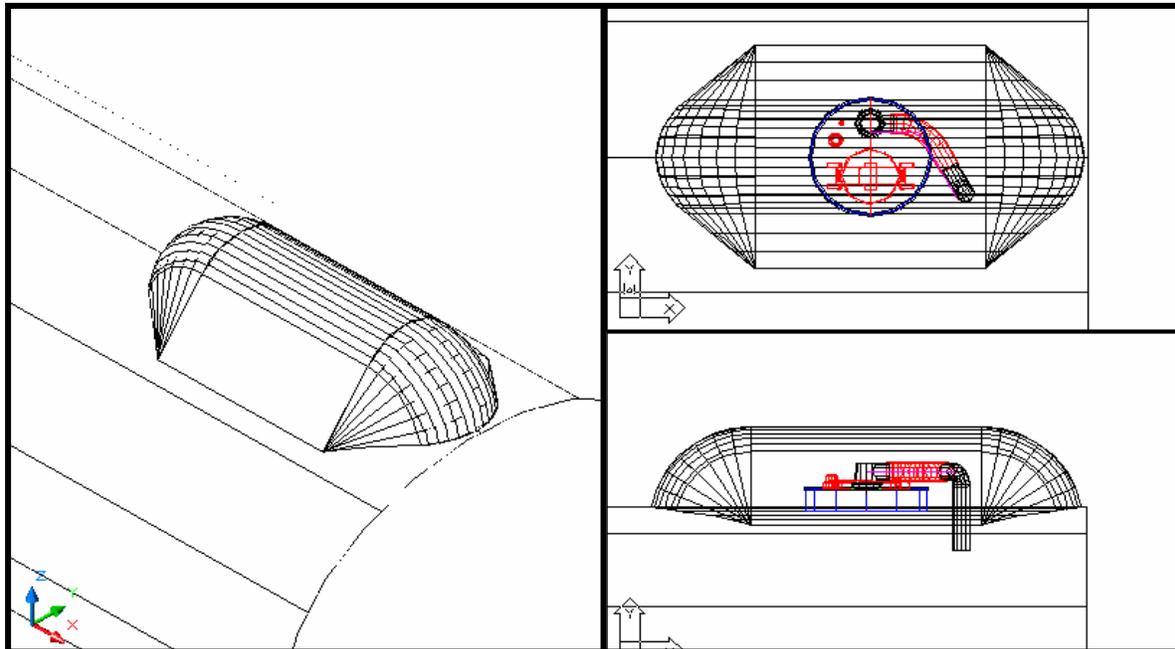
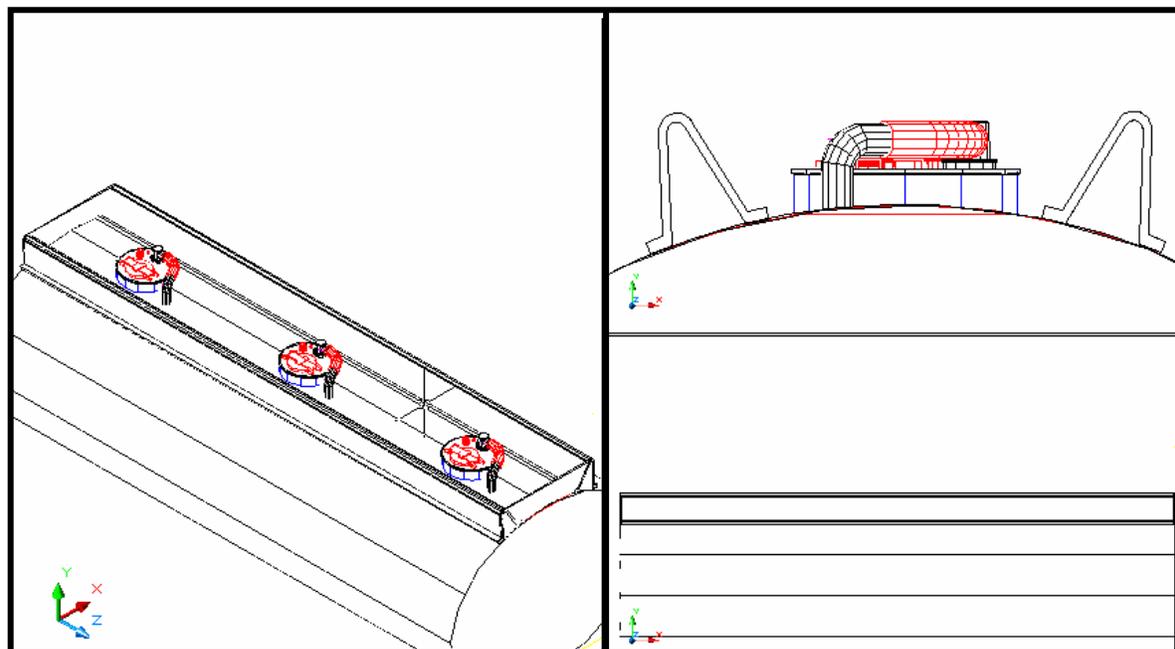
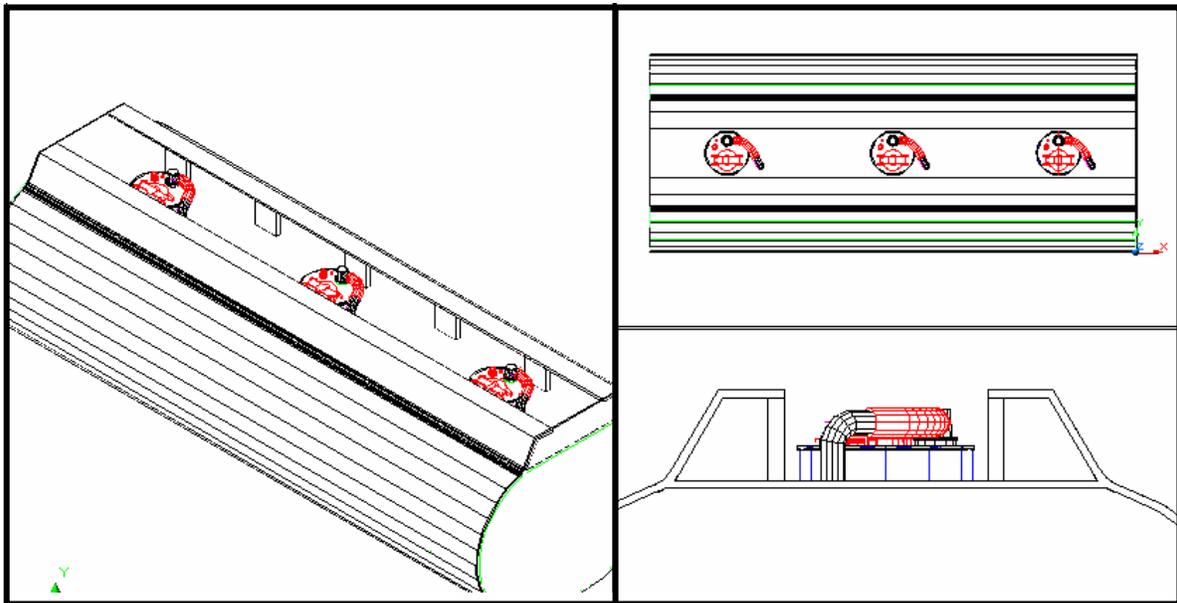


Fig 21. Protección ante volcaduras ideada por la NASA (NTSB, 1992)

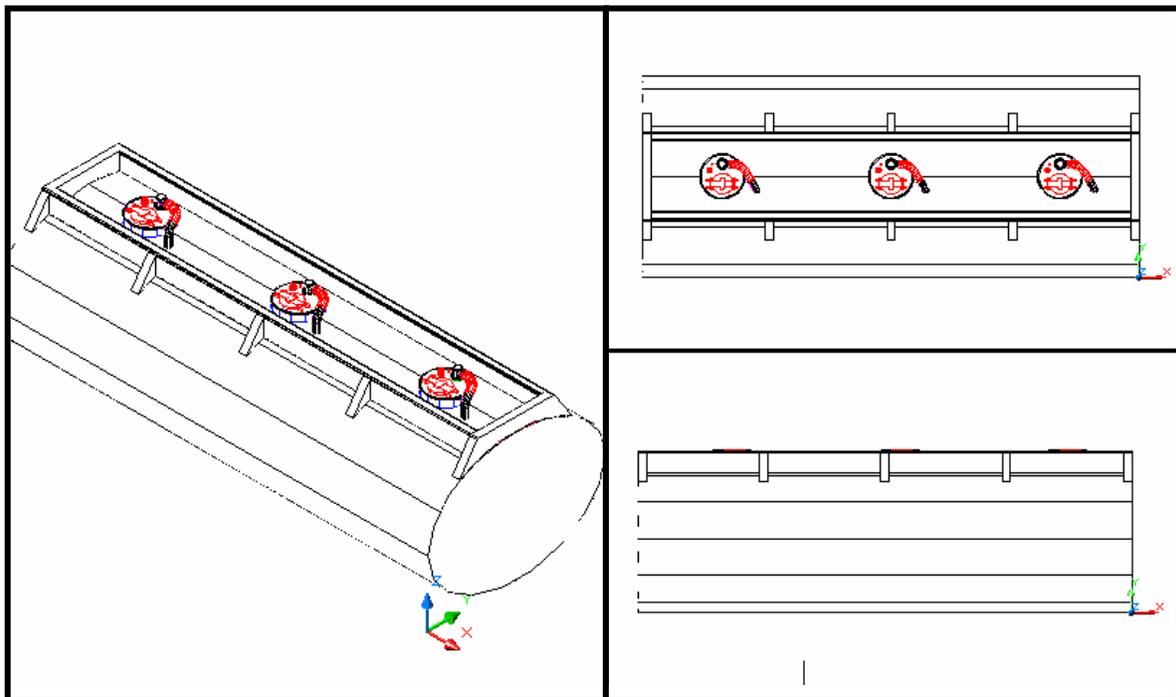


(a)

Fig 22. Distintos diseños de protecciones continuas, (a) diseño de canal triangular invertido



(b)



(c)

Fig 22. Distintos diseños de protecciones continuas (cont), (b) diseño de riel con placas soporte; (c) con refuerzos laterales

4.2.3 Evaluación de los diseños de la protección

Los distintos diseños recién descritos pueden analizarse en cuanto al nivel de protección que proporcionan, atendiendo las siguientes características:

- Capacidad de distribuir la fuerza de impacto sobre el tonel
- Capacidad de transformar energía de impacto en energía de deformación plástica
- Capacidad de resistir la penetración de objetos en el área protegida

En general, un autotank con un sólo domo, esto es, que consista en un único compartimiento, no requiere protección continua a lo largo del tonel, en esos casos se emplean protecciones discretas las cuales pueden tener diferentes diseños. A continuación se comentan estos tipos de protecciones discretas.

Protección discreta tipo estructura (fig 18 (a))

Proporciona una estructura a la medida del domo del tonel, por lo que la penetración de objetos al área protegida se limita a artefactos de tamaño relativamente pequeño, lo cual constituye una ventaja importante. Sin embargo, este diseño tiende a concentrar las cargas de impacto en pequeñas áreas del tonel, con lo que se hace probable que el tonel resulte perforado ante un evento tipo volcadura.

Otra desventaja en este tipo de arreglos de estructuras discretas, es que ante la ocurrencia de volcaduras oblicuas, cualquier elemento protegido pudiera ser sometido a la carga total del impacto. Esto es, no existiría una transmisión de las fuerzas hacia los otros elementos de protección.

Protección discreta tipo marco tubular

Este arreglo, fig 19 (a), constituye de hecho una protección semicontinua, por lo que no padece en gran medida de las limitaciones expuestas anteriormente para las protecciones discretas. Este arreglo tiene la capacidad de distribuir la carga del impacto sobre un área mayor, lo cual ocurrirá sin importar el ángulo del percance durante la volcadura. Sin embargo, este tipo de arreglos carece de la capacidad de brindar protección en el área protegida, esto es, puede ser penetrada por objetos durante el accidente.

De las variantes de este tipo de protecciones (fig 19), se puede inferir que el diseño de la parte (b), representa un diseño mejorado del ilustrado en (a). El contorno curvo del diseño de la figura (b) permite proteger de manera específica el componente de mayor altura, como se hace ver en la fig 23. Por otro lado, la curvatura provista en el diseño de la fig (b), permite que la fuerza asociada a un impacto a 45 grados se distribuya de mejor manera sobre el componente mismo

y el tanque. Desafortunadamente, esta curva provoca que no haya un “freno” durante el percance del vehículo, posterior a su volcadura. El freno puede ser proporcionado por una protección rectangular, como se muestra en la fig 23.

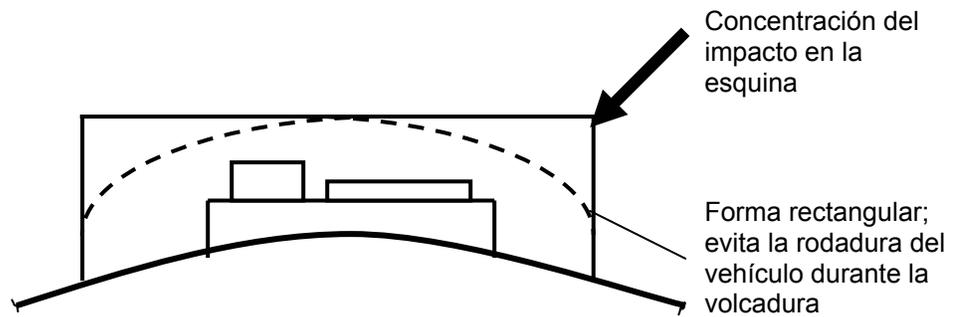


Fig 23. **Efecto de la curvatura en el diseño de una protección discreta**

Protección continua

Este diseño (fig 22) permite distribuir la carga del impacto en la mayor área posible del tonel. Sin embargo, aparentemente, las limitaciones en cuanto al peso de estos dispositivos ha ocasionado que sufran colapsos totales durante las volcaduras, producto de las severidades de los impactos (NTSB, 1992). Al respecto, como se ilustró en la fig 22(c), algunas de las protecciones están reforzadas con elementos discretos, los cuales proporcionan rigidez y resistencia al ensamble. Al igual que para el caso de la protección semicontinua mencionada, las protecciones continuas no proporcionan resistencia alguna a la penetración de objetos en el área protegida.

4.2.4 Desarrollo del diseño conceptual

Se establecen los módulos que componen el equipo a ser diseñado, estableciendo la relación entre ellos así como sus principios de operación. La fig 24 presenta la definición de los seis módulos y sus interacciones; se puede observar que el módulo tonel es un módulo externo. Las interacciones entre los módulos consisten en fuerzas y en momentos.

Descripción de los módulos

Módulo AT. Comprende los componentes de fijación del dispositivo de protección con el tonel del tanque

Módulo PO. Abarca las superficies sobre las cuales el operador podrá moverse, con objeto de inspeccionar los equipos protegidos

Módulo SI. Estas superficies comprenden las partes de la protección que entrarán en contacto con las superficies golpeadas por el vehículo durante su volcadura

Módulo PD. Significa las restricciones y canalizaciones necesarias para conducir al eventual fluido derramado a un depósito seguro

Módulo TA. Consiste del tonel o cuerpo contenedor del líquido transportado

Módulo ES. Este módulo comprende la estructura que da apoyo a las superficies de impacto y paredes de derrame al transmitir las fuerzas y momentos, al módulo de acoplamiento con el tonel (AT)

Definición de los principios de operación de los módulos

Se presenta el proceso de selección del principio de funcionamiento de los distintos módulos. Para cada uno se plantean diferentes alternativas de construcción, efectuándose el análisis correspondiente para elegir el principio de operación más conveniente.

Principios de operación del Módulo ES

Se identifican dos aspectos a ser evaluados con respecto a este módulo. Uno de ellos corresponde a la característica de protección continua provista al tonel. Por otro lado, se puede atender el método de construcción. Adicionalmente, la orientación de la estructura, que se considera puede ser con sus ejes paralelos y normales al eje longitudinal del tonel, o bien que los ejes de la estructura soporte pueden ser oblicuos con respecto al eje longitudinal del tonel.

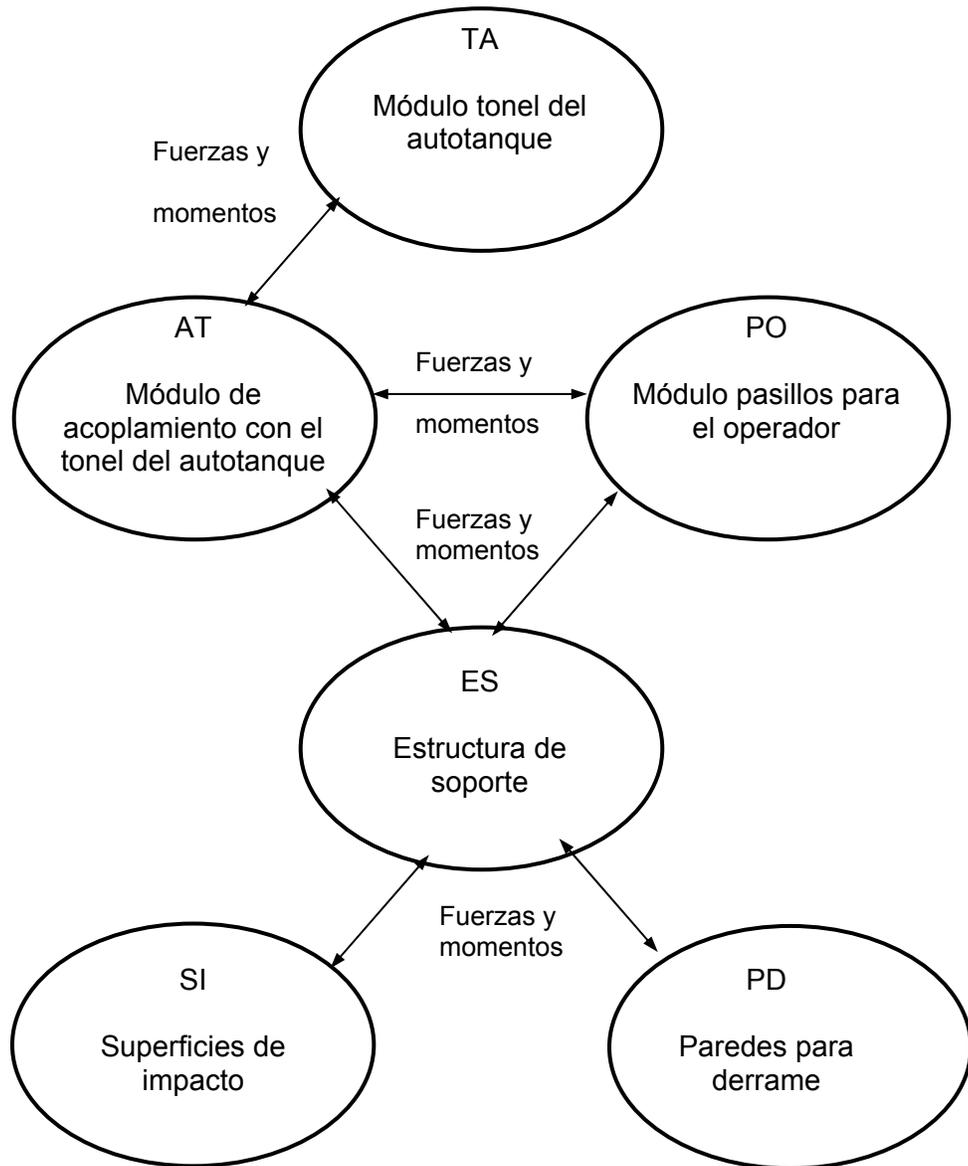


Fig 24. **Módulos del diseño conceptual**

Por lo que toca a la primera de las características a ser evaluadas, esto es, si se construyen de manera continua o discreta, los criterios de evaluación son los siguientes:

- Área protegida
- Capacidad de absorber energía de impacto
- Costo de fabricación

- Confiabilidad
- Peso
- Durabilidad

Estos criterios se han ponderado, como se muestra en la matriz de evaluación en la tabla 5. Las calificaciones sin ponderar, se tomaron de la siguiente manera:

100%	Satisfacción completa
90%	Satisfacción notable
75%	Satisfacción considerable
50%	Satisfacción moderada
25%	Satisfacción menor
10%	Satisfacción mínima
0%	No satisfactorio

Estas referencias de evaluación se tomaron para todas las características. De esta manera, la introducción de los factores de ponderación de las propiedades evaluadas (columna 2 de la tabla 5), dan un peso diferencial a las diversas propiedades evaluadas, de acuerdo con su importancia.

Tabla 5. Matriz de evaluación para el módulo ES en cuanto a su característica de continuidad

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Protección discreta %	Protección continua %
Peso material	0.1	90 / 9	60 / 6
Costo fabricación	0.05	80 / 4	70 / 3.5
Capacidad para absorber la energía	0.15	70 / 10.5	90 / 13.5
Área protegida	0.3	70 / 21	90 / 27
Confiabilidad	0.3	60 / 18	90 / 27
Durabilidad	0.1	75 / 7.5	85 / 8.5
Resultado de la evaluación	1.0	70	85.5

Respecto a los métodos de construcción del módulo ES, se identifican dos variantes en cuanto a la construcción de la estructura entre las superficies de impacto, y el acoplamiento con el tonel: I) construcción de placa, y II) construcción de celosía. Ambos métodos se ilustran en la fig 25. Los criterios de selección para establecer el más adecuado principio de operación son los siguientes:

- Peso del material
- Costo de fabricación
- Capacidad para absorber la energía
- Confiabilidad
- Durabilidad

La matriz de evaluación acerca de los métodos de construcción para el módulo ES se muestra en la tabla 6. Se puede observar que el método de fabricación en placa resultó mejor para los fines propuestos.

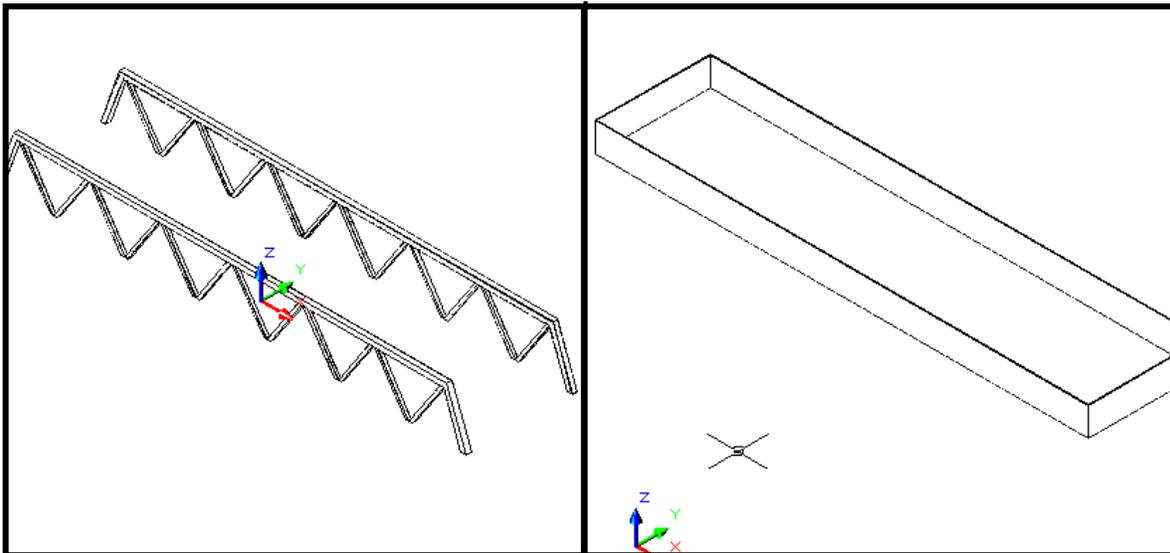


Fig 25. Métodos de construcción del módulo estructura de soporte

Tabla 6. Matriz de evaluación para el módulo ES en cuanto al método de construcción

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Protección de celosía %	Protección de placa %
Peso material	0.1	90 / 9	60 / 6
Costo fabricación	0.2	50 / 10	90 / 18
Capacidad para absorber la energía	0.3	90 / 27	70 / 21
Confiabilidad	0.3	60 / 18	90 / 27
Durabilidad	0.1	75 / 7.5	85 / 8.5
Resultado de la evaluación	1.0	71.5	80.5

En el aspecto de orientación de la estructura de soporte, la fig 26 contiene las dos variantes consideradas, mientras que la tabla 7 presenta la matriz de evaluación correspondiente.

Principios de operación del módulo AT

No se encontró alternativa para el método de fijación de la estructura soporte del tonel, o sea que para realizar esta función se emplearán placas soldadas entre la placa soporte y el tonel.

Principios de operación del módulo SI.

Las variantes para las formas de superficies de impacto son:

- Superficie recta horizontal
- Superficie curva

Ambos modelos se ilustran en la fig 27, mientras que la tabla 8 presenta la matriz de evaluación.

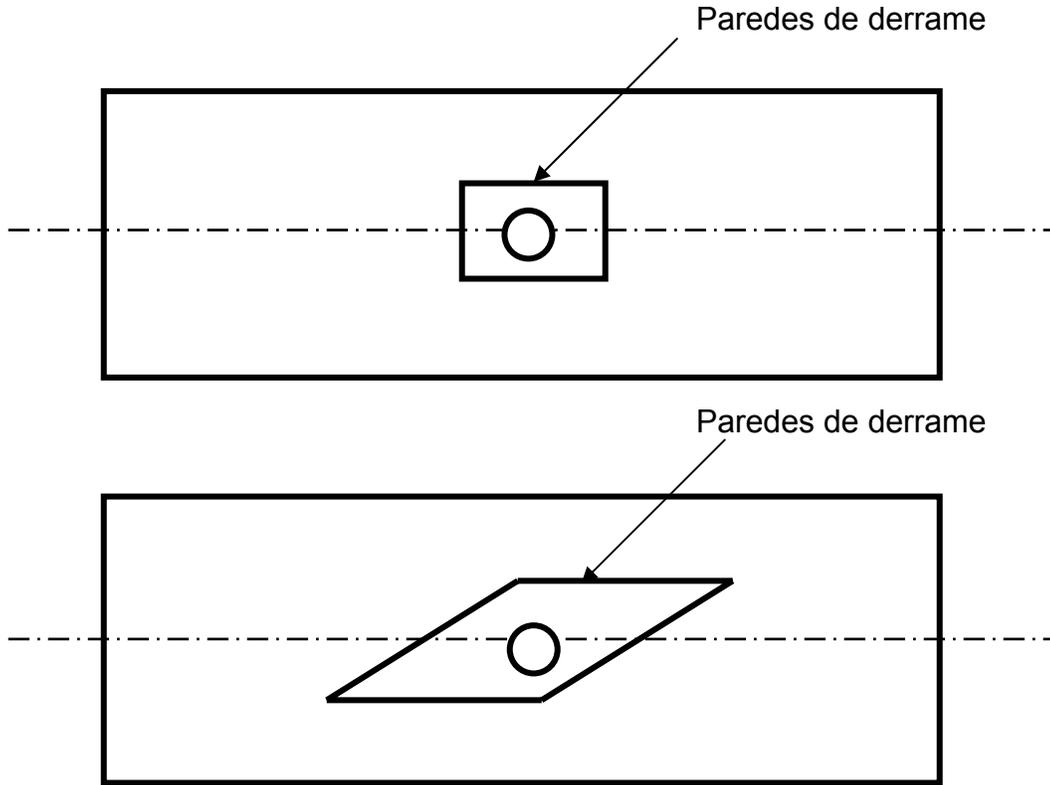


Fig 26. Opciones de orientación de la estructura de soporte

Tabla 7. Matriz de evaluación para el módulo ES en cuanto a la orientación

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Protección paralela %	Protección oblicua %
Peso material	0.1	90 / 9	80 / 8
Costo fabricación	0.2	90 / 18	50 / 10
Protección provista	0.4	60 / 24	90 / 36
Confiabilidad	0.2	80 / 16	80 / 16
Durabilidad	0.1	80 / 8	80 / 8
Resultado de la evaluación	1.0	75.	78.

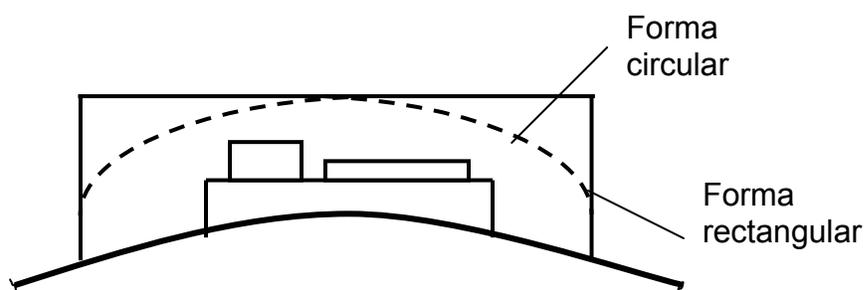


Fig 27. Opciones para las superficies de impacto

Tabla 8. Matriz de evaluación para el módulo ES en cuanto a su característica de continuidad

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Protección curva, %	Protección cuadrada, %
Peso material	0.1	90 / 9	70 / 7
Costo fabricación	0.1	70 / 7	80 / 8
Capacidad para absorber la energía	0.15	90 / 13.5	80 / 12
Resistencia a la rodada	0.15	70 / 10.5	90 / 13.5
Área protegida	0.25	70 / 17.5	90 / 22.5
Confiabilidad	0.15	70 / 10.5	90 / 13.5
Durabilidad	0.1	85 / 8.5	85 / 8.5
Resultado de la evaluación	1.0	72.3	85.0

Principios de operación para el módulo PO

Las variantes en este caso son:

- Pasillo interior del área protegida, colocando una superficie antiderrapante sobre el tonel
- Un pasillo exterior al área protegida, construido a base de una rejilla con pasamanos perimetral a la altura de las protecciones ante volcadura

Estos arreglos se presentan en la fig 28. Los criterios de selección para establecer el más adecuado principio de operación son:

- Peso material
- Costo fabricación
- Confiabilidad
- Durabilidad
- Seguridad para el operador

La matriz de evaluación acerca de los métodos de construcción para este módulo PO, se presenta en la tabla 9.

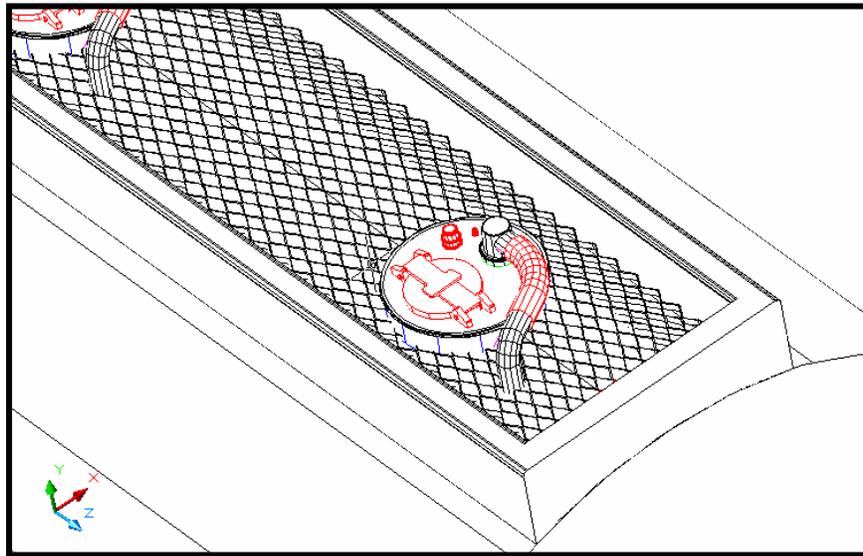
Principios de operación del módulo PD

No se encontró alternativa para las características de construcción y geométricas de las paredes de placa, que contienen el potencial material derramado.

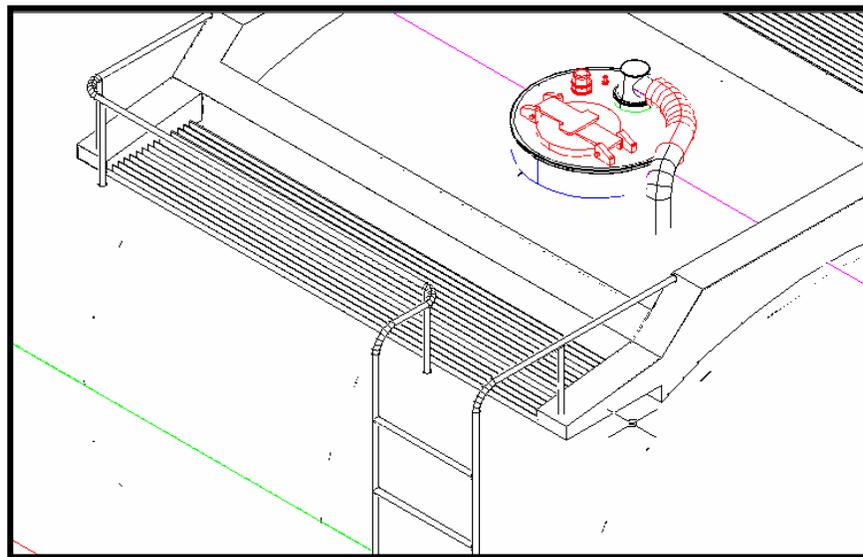
4.2.5 Descripción del diseño conceptual resultante

La fig 29 representa el diseño conceptual resultante, el cual incorpora los principios de operación resultantes de las evaluaciones, incluyendo la orientación y otras características tales como pasillos exteriores.

El diseño se estima proporcionará mayor protección ante volcaduras, dado que la mayor parte de muebles urbanos y construcciones están orientados vertical u horizontalmente.



(a)



(b)

Fig 28. Variantes para el diseño del pasillo para operador, (a) interior; (b) exterior con pasillo

Tabla 9. **Matriz de evaluación para el módulo PO**

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Pasillo Interior %	Pasillo exterior %
Peso material	0.2	90 / 18	70 / 14
Costo fabricación	0.1	90 / 9	70 / 7
Confiabilidad	0.2	80 / 16	80 / 16
Durabilidad	0.2	80 / 16	90 / 18
Seguridad para el operador	0.3	50 / 15	90 / 27
Resultado de la evaluación	1.0	74.	82.

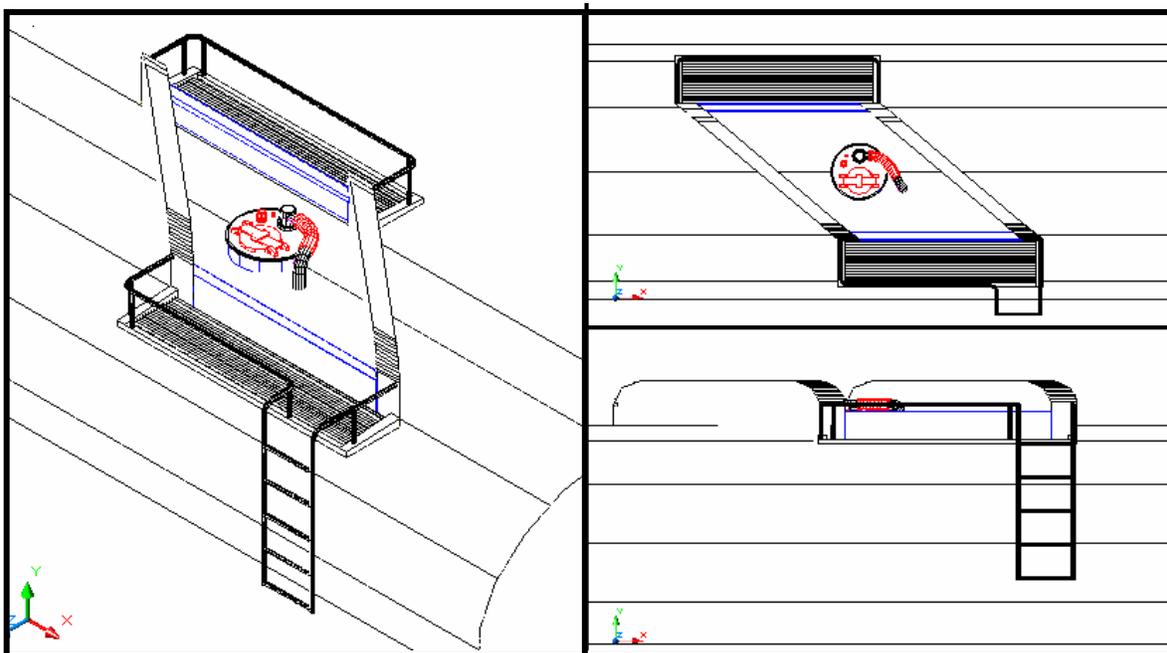


Fig 29. Diseño conceptual resultante

Capítulo 5

Elementos para una propuesta de norma para los dispositivos de protección ante volcaduras

Con respecto al desempeño de las protecciones ante volcaduras, en este capítulo se proponen algunas características que deberían incorporarse en las regulaciones actuales. Los planteamientos se basan en el análisis estadístico de simulaciones de volcaduras reportadas en la literatura, junto con elementos del diseño conceptual propuesto en la sección capitular anterior.

5.1 Simulación de volcaduras en la Universidad de Michigan

A raíz de que varios autotanques sufrieron volcaduras en las que se presentaron derrames de sustancias peligrosas, producto de la aparente falla de las protecciones ante este tipo de percances, el Instituto de Investigación en el Transporte de la Universidad de Michigan, UMTRI, llevó a cabo una investigación al respecto. Como resultado, en 1998 se concluyó un estudio acerca de la dinámica de los autotanques y sus implicaciones sobre el desempeño de los dispositivos para protección ante volcaduras (Winkler, et al, 1998). En dicho estudio se emplearon técnicas de simulación por computadora a partir de un programa de dinámica de vehículos (Trucksim). A este programa, que no contemplaba la volcadura, se le amplió el alcance hasta simular el contacto de las partes de los autotanques con las superficies de impacto (pavimentos, tierra, laderas, árboles, muebles urbanos).

De la caracterización de cinco vehículos articulados y dos no-articulados respecto a masa, rigidez y dimensiones, se efectuaron 126 corridas de simulación para cada vehículo, bajo distintas condiciones de cambios direccionales que desembocaban en una volcadura, tipificando estas situaciones de acuerdo a con su nivel de severidad: de una mínima a muy bajas velocidades, hasta un nivel alto de severidad en el caso del impacto lateral de las llantas contra las banquetas bajo condiciones de alta velocidad. A partir del análisis de las superficies involucradas, tanto del vehículo como de las superficies contra las cuales se golpea, se definieron parámetros que describen las condiciones dinámicas del impacto ante volcaduras. Tales parámetros se utilizaron como base para establecer un comportamiento fuerza-deflexión de las superficies del tonel, siendo posible establecer a partir de esto, características potenciales de resistencia requeridas en los dispositivos de protección.

De los análisis se obtuvo que la posición angular del tanque con respecto a la superficie contra la cual se impacta, es un factor importante para determinar la

severidad del efecto de la volcadura sobre el autotanque. De esta manera, un impacto a un ángulo entre 10 y 15 grados, comparado con un impacto de plano con plano, representa un efecto hasta diez veces más severo.

Los resultados pusieron en evidencia la falta de requerimientos suficientes sobre la resistencia de estos dispositivos en las normas actuales. De ahí se derivó la necesidad de distribuir los impactos en un área mayor de la superficie del tanque, con lo que resultarían insuficientes dispositivos del tipo grapa o discretos. También se desprende del estudio que existiría una relación estrecha entre la resistencia al aplastamiento del dispositivo y aquella del tanque, de tal suerte que en el mejor de los casos, el aplastamiento debería compartirse entre la protección y el tonel.

Como recomendaciones del estudio se planteó que las normas de diseño de estos dispositivos se basen en el desempeño de los mismos, o sea no de acuerdo con una capacidad o diseños fijos, sino en términos de la velocidad y ángulos de impacto. Otra recomendación consiste en que deberían establecerse criterios de resistencia mínimos, proponiendo que la velocidad de impacto que deberían resistir los dispositivos sea de 8 m/s, y en el caso del impacto con superficies planas, a ciertos ángulos entre los cuerpos de impacto.

Comentarios al estudio de UMTRI

Se precisa en este reporte la falta de un estudio en cuanto a la severidad sobre las superficies de impacto ante una volcadura. Tal distribución permitiría conocer las áreas que deberían ser mayormente protegidas en caso de la volcadura del vehículo. Por otro lado, alguna limitación del estudio se identifica sobre a que se supone que las superficies de impacto son perfectamente planas.

Adicionalmente, en los resultados de UMTRI se consideraron niveles de llenado total de los toneles de los autotanques, asumiendo un nulo efecto del oleaje potencial de los líquidos transportados, sobre la severidad del impacto durante un percance.

5.2 Análisis de las áreas de impacto y severidad

Con base en los resultados de las simulaciones efectuadas por UMTRI en el subcapítulo 5.1, se presenta un análisis de las frecuencias de impacto en las distintas regiones de un tonel montado en un autotanque no articulado de tres ejes.

Maniobras para la volcadura

En el estudio de UMTRI, se consideraron diferentes situaciones como conducentes a una volcadura, incluyendo el impacto o no contra banquetas y rieles de protección de las carreteras. Como situaciones de no impacto contra banquetas y rieles, las maniobras adicionaron vueltas en esquina y en carretera, involucrando diferentes radios de curvatura en cada vuelta. Asimismo, cambios de carril a alta velocidad y maniobras en espiral. En conjunto se hizo alusión a las siguientes maniobras y situaciones:

- Impacto contra banqueta (I-B)
- Impacto contra riel de protección (I-R)
- Maniobra de vuelta en esquina (V-E)
- Maniobra de vuelta en carretera (V-C)
- Maniobra en espiral (espiral)
- Maniobra de cambio de carril a alta velocidad (CCAV)

La fig 30 ilustra algunas maniobras y situaciones; se puede apreciar que la vuelta en esquina se da en un radio de 30 m, mientras que para la vuelta en carretera fue de 152 m.

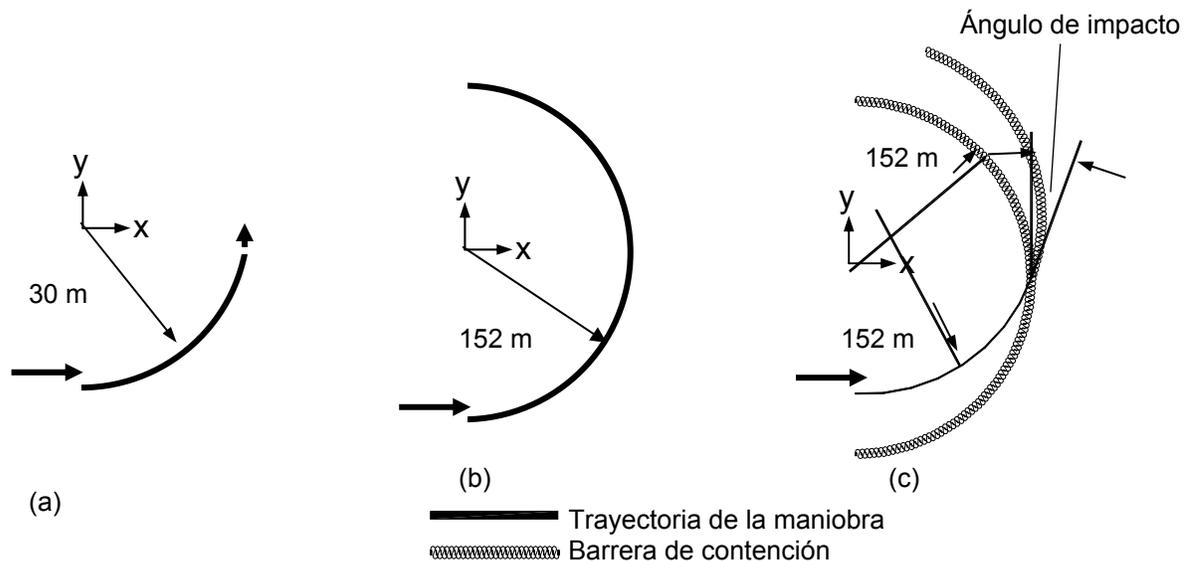


Fig 30. Algunas maniobras y situaciones durante la simulación de los eventos de volcadura, (a) vuelta en esquina; (b) vuelta en carretera; (c) impacto contra riel de protección en curva

En los trabajos de UMTRI, las maniobras simuladas se efectuaron a diversas velocidades, mientras que las maniobras de impacto contra banqueta y riel se llevaron a cabo a distintos ángulos de impacto. La maniobra en espiral consistió de cambiar a un ritmo constante el ángulo del volante (2 grados/s), a una velocidad constante de 64 km/h.

La maniobra de cambio de carril a alta velocidad se simuló en lazo abierto, esto es, sin establecer una trayectoria específica, sino solamente cambiando la posición del volante. La secuencia de esta maniobra consistió en un giro del volante a la izquierda, seguido de un giro correctivo severo a la derecha.

Tabla de resultados para eventos en los que se presentó la volcadura

Del total de simulaciones, una parte de ellas no desembocó en volcadura (42 de 63). La fig 31 presenta los ejes de referencia en las simulaciones. En la tabla 10 se incluyen los resultados de las simulaciones, con las siguientes características:

- Tipo de maniobra
- Velocidad
- Ángulo de impacto
- Radio de la vuelta
- Ángulo de oscilación longitudinal al impacto (AOL)
- Ángulo de oscilación transversal al impacto (AOT)
- Ángulo de oscilación vertical al impacto (AOV)
- Velocidad longitudinal del punto de impacto (VX)
- Velocidad transversal del punto de impacto (VY)
- Velocidad vertical del punto de impacto (VZ)
- Velocidad total (VT)
- Región de impacto (RI)

A excepción de la velocidad total (VT) y de la región del primer impacto (RI), los resultados y condiciones de la tabla 10 se tomaron del reporte de UMTRI.

La velocidad total o resultante del punto del primer impacto se consideró como una medida de la severidad de la volcadura. Combinando este resultado con el dato de la región de impacto, se establecen valores globales de la severidad del impacto como una función de la región del primer impacto. La fig 32 ilustra las 24 regiones de impacto, identificadas en el tonel del autotranque.

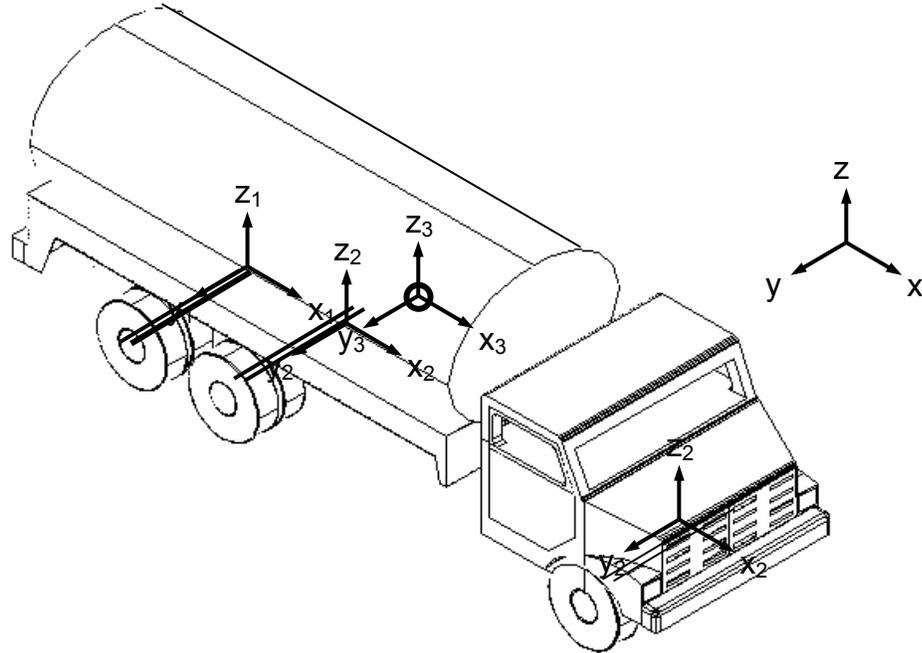


Fig 31. Ejes de referencia para las maniobras simuladas

Análisis de la severidad de impacto en las distintas regiones del tonel

Los resultados de la tabla 10 sobre la velocidad total del impacto *i* en la región *j*, se obtuvieron mediante la fórmula:

$$VT_{i,j} = \sqrt{(VX_{i,j})^2 + (VY_{i,j})^2 + (VZ_{i,j})^2} \quad (3)$$

Esta velocidad total del punto de impacto se toma en consideración para establecer la severidad del impacto como una función de la superficie expuesta del tonel del autotanque. Las velocidades totales $Vt_{i,j}$ asociadas a cada impacto en las distintas regiones del tonel, han sido sumadas con el propósito de obtener un valor acumulado por cada región *j* del tonel, $VT_{total,j}$:

$$VT_{total,j} = \sum_i^n VT_{i,j} \quad (4)$$

La fig 33 (a) responde a las gráficas de estos valores de velocidad acumulados, como una función de la región del tonel, mostrando que las regiones que

potencialmente presentarían mayor daño son la número 3 y la 4. Las otras dos regiones del tonel donde se presentaría un daño severo son la 23 y la 24. Estas cuatro regiones corresponden a los extremos superiores de ambos extremos del tonel. Los resultados muestran una considerable diferencia entre las distintas regiones del tonel respecto a las velocidades acumuladas totales (el valor para la región 4 es más de tres veces el valor del área 24).

Es importante señalar que las velocidades de impacto en las que el ángulo de oscilación vertical resultó ser cero al momento del percance, la velocidad de impacto se distribuyó uniformemente entre las áreas del costado del tonel.

Las velocidades acumuladas de impacto se asociaron a distintos tonos de color negro, tomando los valores máximos como los más oscuros (fig 34).

Las distintas regiones de impacto se manejaron, mediante AUTOCAD, tomando el momento de impacto en cada una de las configuraciones de volcadura, presentadas en la tabla 10. La fig 35 incluye algunas configuraciones del vehículo durante su volcadura.

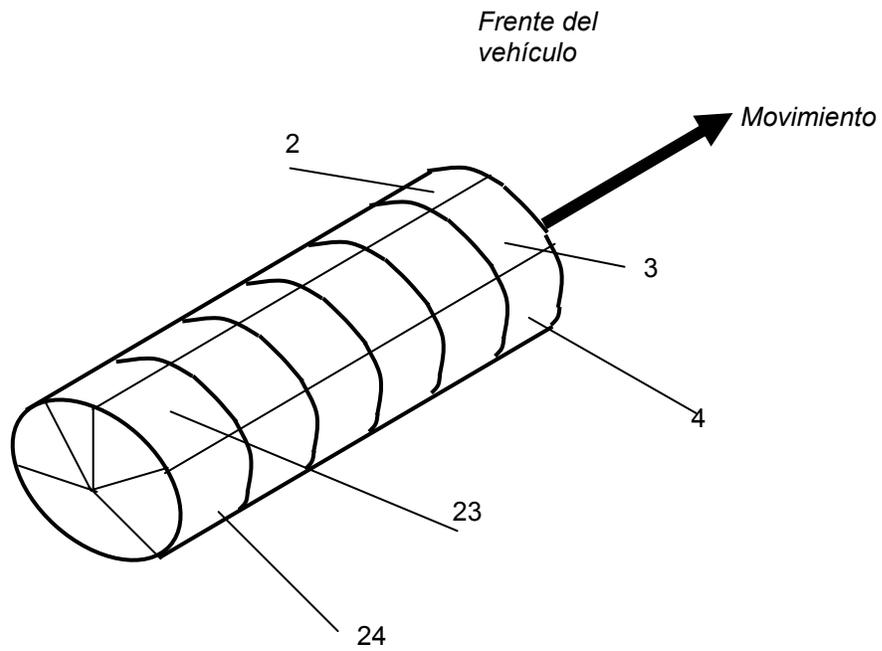
Se estima que ahora se cuenta, con algunos elementos susceptibles de ser aplicados para obtener algunas medidas de desempeño, las cuales deberían ser establecidas como parte de una norma nacional para diseño de dispositivos de protección de los autotankes ante volcaduras.

5.3 Criterios de desempeño para las protecciones

Los criterios de desempeño a ser tomados en cuenta en una potencial norma nacional para diseño de dispositivos de protección, podrían basarse en los niveles de severidad del impacto, analizando además las situaciones más susceptibles en el caso de una volcadura. Uno de los criterios para diseño consideraría, entonces, la situación más crítica frente a una volcadura. Sin embargo, tal situación de especificar una resistencia para el peor de los impactos, podría ser no viable por el costo que representaría el desarrollo y construcción de estos dispositivos. Adicionalmente, los pesos involucrados en tales dispositivos, habrían de impactar negativamente en los costos de operación de los vehículos.

Tabla 10. Resultados y condiciones de las volcaduras simuladas por UMTRI (NA: no aplicable)

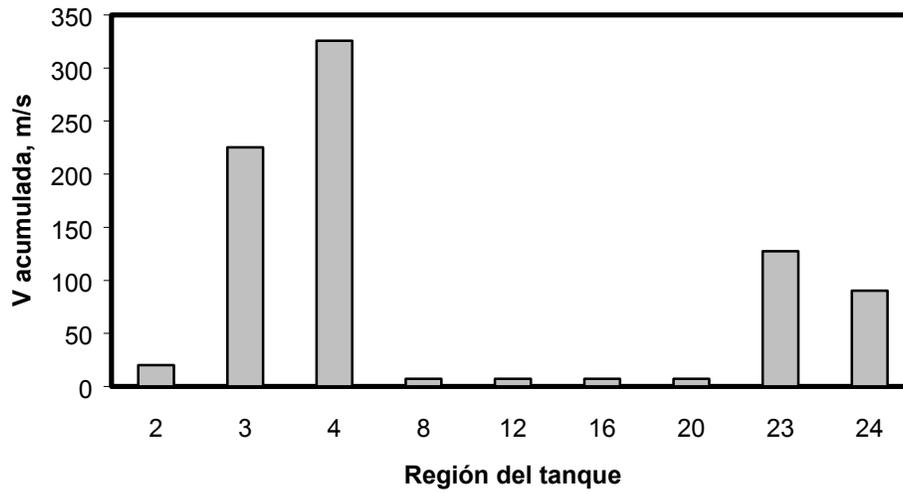
No.	Maniobra	v	AI	R	AOL	AOT	AOV	VX	VY	VZ	VT	Región
1	I-B	72.4	5	152.5	107.2	0.3	23.9	18.6	1.6	-3.6	19.0	24
2	I-B	80.5	5	152.5	101.6	2.0	14.0	20.2	2.0	-5.8	21.2	24
3	I-B	88.5	5	152.5	98.8	-0.6	-2.2	25.1	-4.9	-4.8	26.0	4
4	I-B	56.3	10	152.5	95.8	-3.2	32.3	14.0	1.3	-4.2	14.6	4
5	I-B	56.3	10	152.5	103.3	-0.5	34.8	12.9	1.2	-3.2	13.3	4
6	I-B	64.4	10	152.5	96.7	3.7	22.4	12.7	1.6	-8.2	15.2	24
7	I-B	72.4	10	152.5	99.9	-0.4	24.9	19.2	0.3	-5.0	19.9	4
8	I-B	80.5	10	152.5	107.5	-3.0	27.2	21.9	-1.2	-5.2	22.6	4
9	I-B	88.5	10	152.5	98.8	-0.6	-2.2	25.1	-4.9	-4.8	26.0	4
10	I-B	56.3	20	152.5	100.9	8.7	51.5	11.3	-4.4	-4.1	12.8	24
11	I-B	64.4	20	152.5	132.0	5.4	65.5	10.9	-5.3	-4.9	13.1	23
12	I-B	72.4	20	152.5	179.9	-0.2	79.5	8.6	-17.1	-4.5	19.7	2, 3
13	I-B	80.5	20	152.5	180.0	-4.0	72.2	11.5	-16.5	-2.2	20.2	2, 3
14	I-B	88.5	20	152.5	98.8	-0.6	-2.2	25.1	-4.9	-4.8	26.0	4
15	I-R	88.5	10	152.5	99.2	-0.5	-2.5	25.0	-4.8	-4.7	25.9	4
16	I-R	72.4	10	152.5	90.5	-5.1	39.3	18.7	-3.2	-3.9	19.4	4
17	I-R	80.5	10	152.5	77.1	-16.8	30.4	23.3	-3.4	-5.8	24.2	4
18	I-R	88.5	10	152.5	98.8	-0.6	-2.2	25.1	-4.9	-4.8	26.0	4
19	I-R	56.3	20	152.5	139.6	12.5	45.0	12.6	-0.7	-4.0	13.2	23
20	I-R	56.3	20	152.5	139.7	11.8	46.6	12.6	-1.1	-4.0	13.3	23
21	I-R	64.4	20	152.5	142.5	8.8	64.0	12.8	-4.4	-3.6	14.0	23
22	I-R	72.4	20	152.5	155.9	5.6	69.5	13.8	-6.4	-2.0	15.4	23
23	I-R	80.5	20	152.5	137.5	-3.4	70.7	17.6	-15.6	-6.7	24.5	3
24	V-E	64.4	NA	152.5	103.1	-2.0	46.4	15.7	-7.1	-4.6	17.8	4
25	V-E	88.5	NA	152.5	109.7	-3.0	40.3	21.4	-10.4	-4.4	24.2	3
26	V-C	88.5	NA	152.5	100.3	-0.4	39.6	23.1	-5.2	-4.6	24.1	4, 3
27	V-C	104.6	NA	152.5	104.7	-1.2	37.2	25.0	-6.9	-4.5	26.3	3
28	V-C	112.6	NA	152.5	111.0	-2.0	35.3	28.7	-9.8	-4.3	30.6	3
29	Espiral	64.4	NA	NA	94.1	-0.1	-73.4	15.4	-4.3	-4.3	16.5	4 - 24
30	I-B	56.3	30	152.5	131.4	4.1	67.1	8.4	-3.9	-5.0	10.5	23
31	I-B	64.4	30	152.5	132.1	-4.6	68.9	9.6	-15.8	-4.7	19.1	3
32	I-B	72.4	30	152.5	146.9	-7.8	67.7	11.2	-16.1	-3.6	19.9	3
33	I-B	80.5	30	152.5	147.3	22.8	13.5	16.4	4.8	-2.7	17.3	23
34	I-B	88.5	30	152.5	98.8	-0.6	-2.2	25.1	-4.9	-4.8	26.0	4
35	I-R	56.3	30	152.5	136.5	7.4	67.5	10.1	-4.1	-4.0	11.7	23
36	I-R	64.4	30	152.5	154.8	0.3	79.2	10.0	-6.2	-1.9	12.0	23
37	I-R	72.4	30	152.5	129.8	-4.3	72.3	15.7	-14.7	-6.2	22.4	3
38	I-R	80.5	30	152.5	121.6	-5.4	73.6	18.3	-17.0	-8.2	26.4	3
39	V-E	43.5	NA	30.5	92.4	0.0	81.9	5.5	9.6	-4.3	11.9	4 - 24
40	CCAV	80.5	NA	NA	101.0	0.4	25.8	21.2	4.0	-4.6	22.1	24



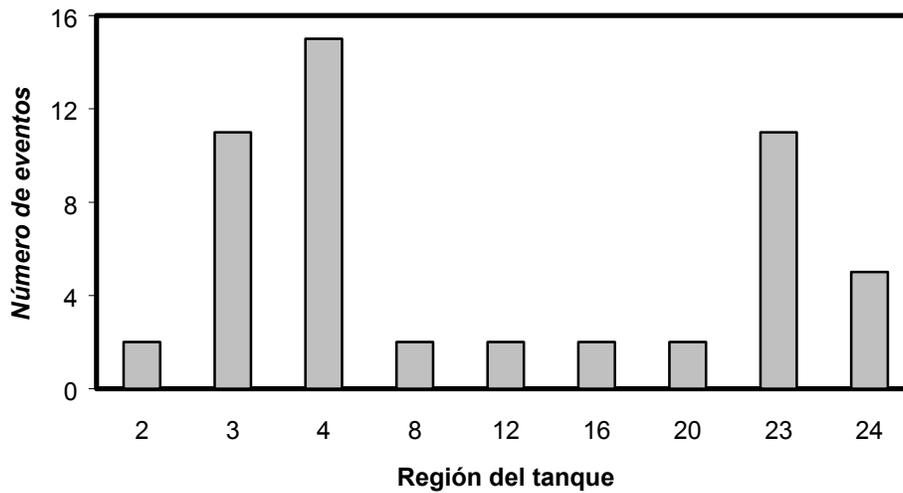
Frente del vehículo

	1	2	3	4	
	5	6	7	8	
	9	10	11	12	
	13	14	15	16	
	17	18	19	20	
	21	22	23	24	

Fig 32. Descripción de las superficies de impacto para el tanque del vehículo simulado



(a)



(b)

Fig 33. Severidad del impacto sobre las distintas áreas, (a) velocidad compuesta del impacto; (b) número de impactos para las simulaciones consideradas

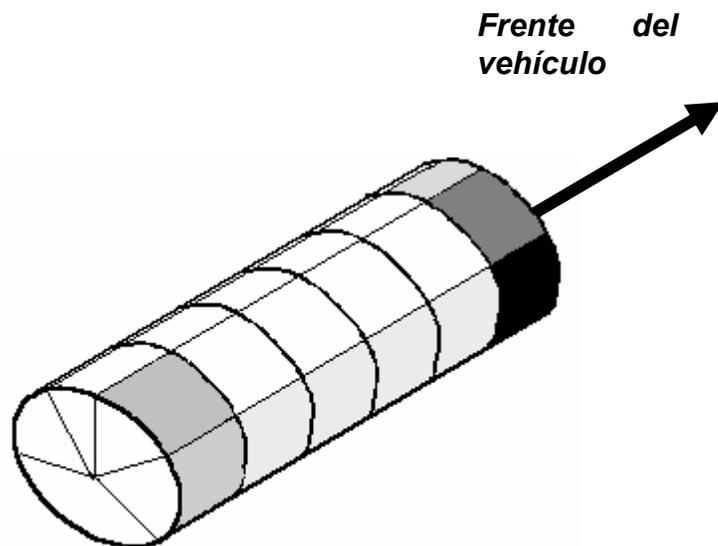
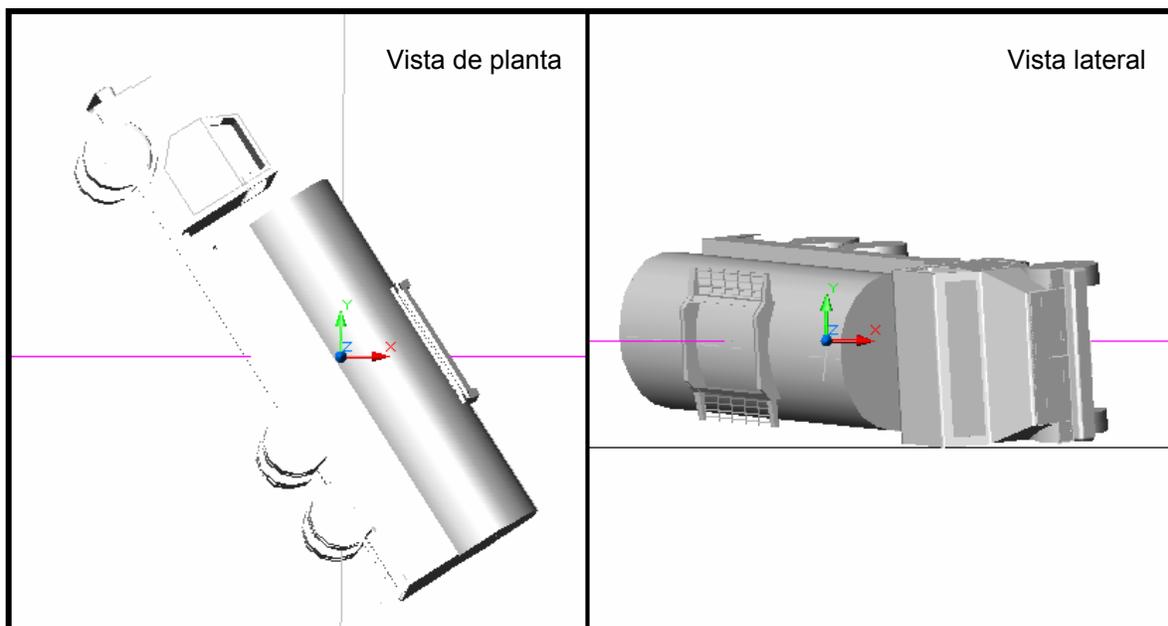
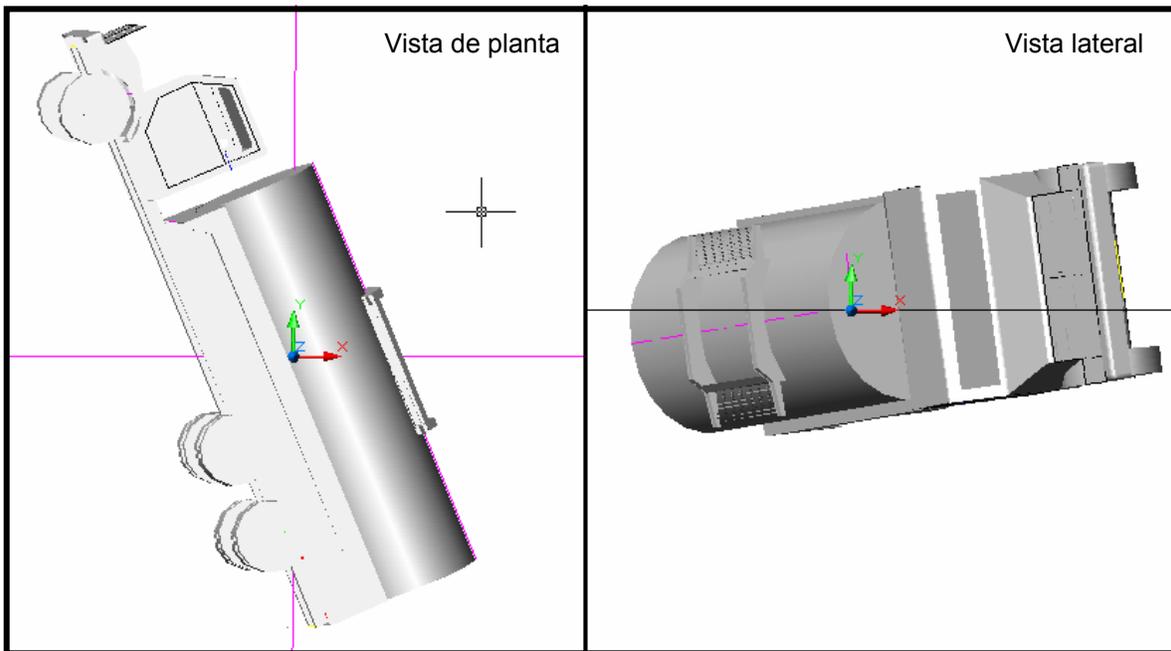


Fig 34. Diagrama de intensidades de la severidad del impacto

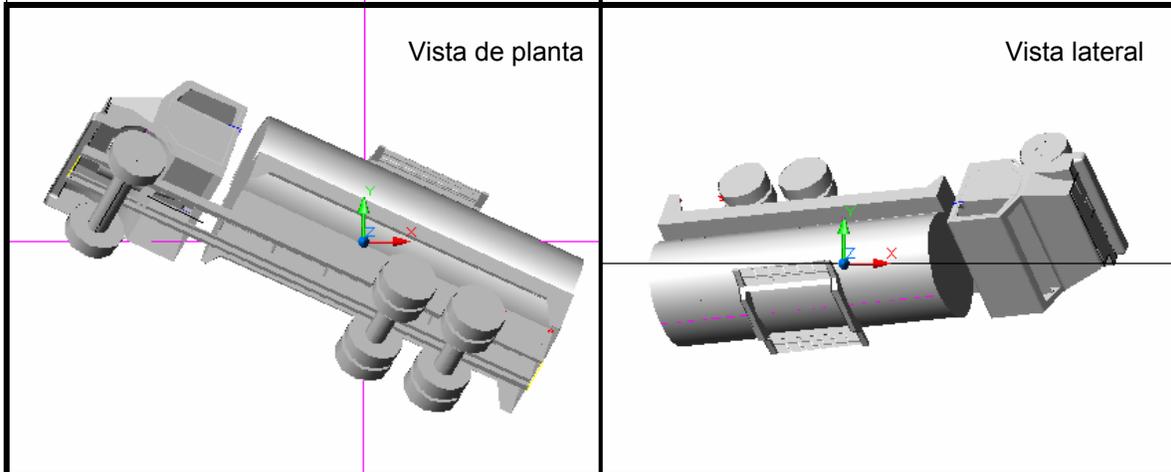


(a)

Fig 35. Posiciones del vehículo en el momento del impacto durante la volcadura, (a) simulación 3 de la tabla 10



(b)



(c)

Fig 35 (Cont). **Posiciones del vehículo en el momento del impacto durante la volcadura, (b) simulación 6; (c) simulación 11 de la tabla 10**

De acuerdo con lo anterior, el establecimiento de las condiciones de diseño de estos dispositivos habría de basarse en el tipo de impacto más comúnmente encontrado en las simulaciones (tabla 10), atendiendo en particular, la velocidad del punto del primer impacto del tonel. La gráficas de la fig 36 hacen referencia a las distribuciones de las velocidades del punto de impacto en los ejes x, y y z. Estos resultados revelan una dispersión importante, siendo las relaciones entre los valores máximos y mínimos de 5.1, 51 y 4.2, respectivamente para las direcciones x, y y z.

Propuesta de especificación de desempeño

Es común en el análisis de los efectos de diferentes factores sobre las condiciones de daño de la infraestructura, adoptar un valor percentil de los valores obtenidos para los factores considerados como una medida de su efecto potencial sobre el estado de la infraestructura.

De la misma manera, en este trabajo se propone tomar como condición de diseño un valor percentil de las velocidades obtenidas en cada una de las direcciones evaluadas. Los valores de 85 percentil correspondientes a las distribuciones de velocidades de impacto en las gráficas de la fig 36, son en cada una de las direcciones, como sigue:

Dirección x: 25 m/s
Dirección y: 14 m/s
Dirección z: 5 m/s

De esta forma, una especificación de la resistencia de los dispositivos de protección ante volcaduras, consistiría en que tales equipamientos deberían ser capaces de resistir impactos a las velocidades y direcciones indicadas.

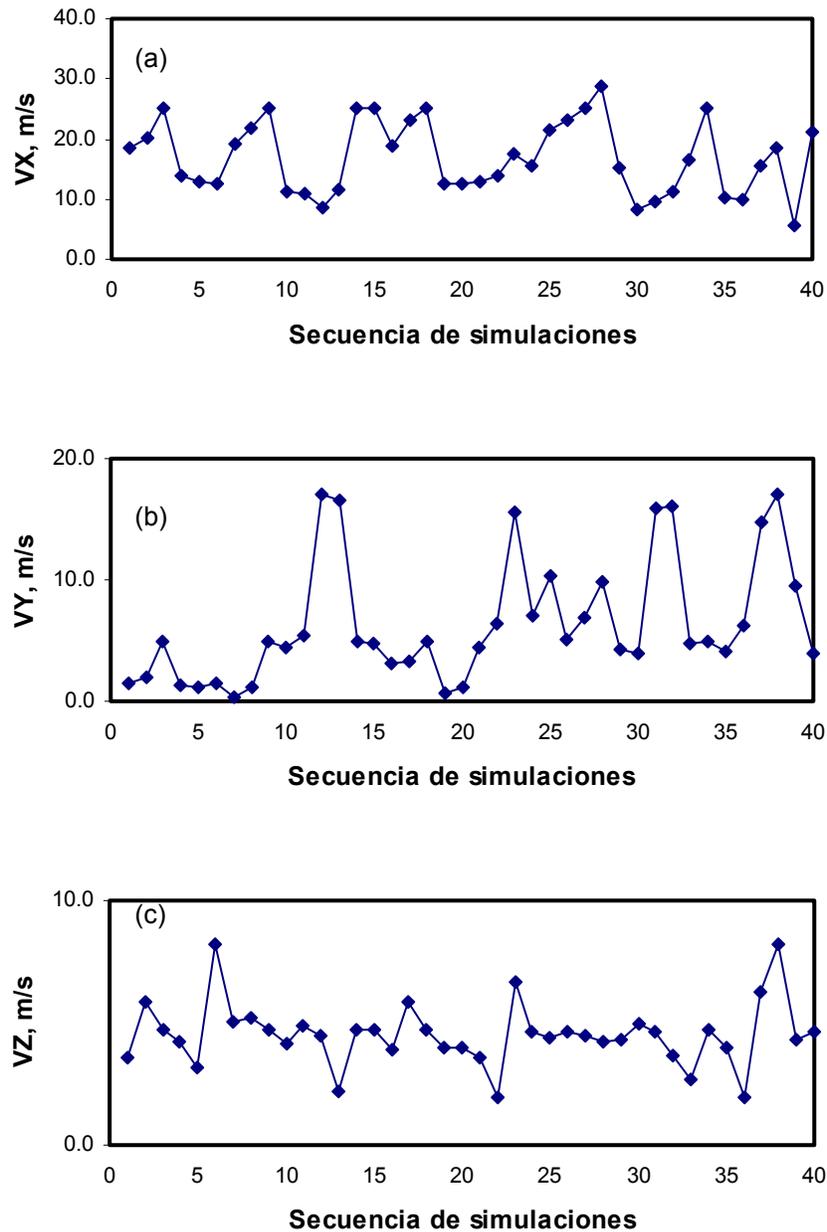


Fig 36. Distribución de las velocidades en los diferentes eventos de volcadura (punto de primer impacto), para las distintas direcciones, (a) VX; (b) VY; y (c) VZ

5.4 Elementos en un proyecto de norma para el diseño y configuración de dispositivos de protección ante volcaduras

De lo expuesto hasta ahora, se configura una serie de requerimientos, los cuales deberían satisfacer las protecciones ante volcaduras de los vehículos para transportar sustancias peligrosas líquidas. Son requerimientos tanto geométricos como relativos a la resistencia de dispositivos ante impactos diversos. En el presente subcapítulo se proponen diversos requerimientos al respecto.

5.4.1 Protección primaria y protección secundaria

Se necesita establecer dos niveles de protección para los toneles de los autotankes: primario y secundario. El nivel primario consiste en los elementos más internos, que evitan que los dispositivos protegidos sean golpeados durante la volcadura. Los elementos secundarios proporcionarían la protección externa de los dispositivos, sirviendo para respaldar la primaria. Estos dispositivos secundarios, sin embargo, no se estiman necesarios en todas las direcciones del impacto. Las protecciones secundarias habrían de dar respaldo ante impactos planos en todas direcciones, pero no ante objetos puntuales en todas direcciones. La propuesta de norma en relación con las dos protecciones, se establece de la siguiente manera:

Los autotankes implican contar con dos niveles de protección ante impactos planos en todas direcciones, entendiéndose por impacto plano aquella colisión en la que los planos del vehículo, en la posición de las protecciones en volcadura, golpean planos paralelos de la infraestructura durante el percance. Las protecciones que deberían responder a los dispositivos del domo de los autotankes, ante eventos de volcadura tanto plana como no plana, son los dispositivos de protección primaria.

5.4.2 Tolerancia para la deformación de los dos niveles de protección

Los cuerpos de los dispositivos de protección primaria y secundaria, constituyen componentes susceptibles de sufrir deformación al ser golpeados durante una volcadura. Se requiere establecer un margen de deformación con objeto de evitar que los artefactos en el domo del tonel sean golpeados. La protección secundaria estaría cubriendo la protección primaria, mientras que la primaria protege directamente los dispositivos montados en el domo del autotankes.

Se propone el siguiente postulado, concerniente a la deformación tolerable de los dispositivos de protección:

Durante su impacto, los dispositivos de protección deberán conservar una tolerancia para su deformación del 10% de sus dimensiones, antes de que permitan el contacto con las partes protegidas. Esto sería aplicable tanto a las protecciones primarias como secundarias.

5.4.3. Niveles de resistencias ante impactos en todas las direcciones

Del análisis de las severidades de impacto durante las simulaciones de volcaduras mediante el UMTRI, se identifica la necesidad de establecer niveles de resistencia al impacto en todas las direcciones, al encontrarse el vehículo cargado a su capacidad total.

En el caso de las protecciones primarias, las velocidades del 85 percentil (subcapítulo 5.3), se consideran convenientes para establecer la resistencia a las velocidades de impacto, en el caso de las protecciones primarias, lo siguiente:

Los dispositivos de protección primaria deberían ser capaces de soportar impactos, sin sufrir una deformación mayor al 10% de su longitud inicial conforme las siguientes velocidades:

Dirección x: 25 m/s
Dirección y: 14 m/s
Dirección z: 5 m/s

Aplicadas de manera independiente.

Las velocidades del 50 percentil (subcapítulo 5.3), se estiman convenientes para el establecimiento de resistencia a las velocidades de impacto en el caso de protecciones secundarias, de la siguiente manera:

Los dispositivos de protección secundaria deberían ser capaces de resistir impactos sin sufrir una deformación mayor al 10% de su longitud inicial, a las siguientes velocidades:

Dirección x: 16 m/s
Dirección y: 5 m/s
Dirección z: 4 m/s

Aplicadas de manera independiente.

Los valores establecidos para las velocidades de impacto se consideran suficientes para salvaguardar las válvulas y registros montados en la parte superior de los autotankes.

5.4.4. Área protegida con base en la penetración de objetos

La penetración de objetos en el área protegida por los dispositivos constituye un riesgo que deberá ser evitado mediante la cercanía de los dispositivos a los objetos protegidos. De esta manera, se establece una distancia máxima entre los dispositivos protegidos y la localización de las protecciones:

Los dispositivos de protección deberán situarse a una distancia no mayor a aquella indispensable para manipular y operar los elementos protegidos del domo del autotanque. Estas distancias necesitan ser establecidas por el fabricante, y aprobadas por algún ingeniero certificador.

5.4.5 Autotanques de varios domos

En el caso de autotanques equipados con varios compartimentos y domos, se considera que es necesario proteger de manera individual cada domo, pudiéndose aplicar una protección secundaria común a todos los domos del autotanque, de la siguiente manera:

En el caso de autotanques equipados con varios domos, registros o dispositivos de acceso a los diferentes compartimentos, deberá brindarse una protección individual a cada domo o conjunto de accesorios del tanque, necesitándose proveer una protección secundaria que cubra la totalidad de los domos y protecciones primarias, como se señala en 5.4.1.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Los dispositivos de protección ante volcaduras, usados en los autotransportes de sustancias peligrosas, y con ello brindar protección a los accesorios y válvulas en la parte superior de sus toneles, constituyen elementos importantes de seguridad vial, en la perspectiva de que la falla de estos equipos, ante la ocurrencia de volcaduras, representa riesgos de derrames de sustancias, incluyendo líquidos inflamables.

El estudio del desempeño de dichos dispositivos se ha dado como consecuencia de una percepción de que los actuales diseños, tanto en Estados Unidos como en México, carecen de los fundamentos físicos necesarios que aseguren su efectividad ante la ocurrencia de estos accidentes. Tales deficiencias en el diseño se atribuyen a que los aspectos normativos no son lo suficientemente específicos en cuanto a resistencia y configuración geométrica.

Las normatividades en Estados Unidos y en México, sólo especifican que los dispositivos de protección ante volcaduras deben tener ciertos niveles de resistencia a cargas estáticas aplicadas tanto vertical como horizontalmente. En el caso de México, se estipula aún como resistencia la que hasta hace diez años se especificaba en la normatividad estadounidense. Sin embargo, dado que de cualquier manera se trata de requerimientos circunscritos a cargas estáticas, tales normas no responden a los desempeños que estos dispositivos deberían tener.

Partiendo del principio general de prevención de accidentes, en este caso volcaduras, se presentó una revisión de medidas tanto de diseño geométrico como de rigidez de los componentes de los vehículos, los cuales podrían mejorar el comportamiento de los transportes en cuanto a su estabilidad lateral.

Se encontró que los factores más importantes que afectan su estabilidad tienen que ver con sus propiedades geométricas (altura del centro de gravedad, separación transversal de los soportes de las suspensiones y separación de las llantas en los ejes), mientras que las características de rigidez de la suspensión y llantas, influyen en un grado menor. Numéricamente, se concluyó que una mejora en las características geométricas y de rigidez puede representar una ventaja de hasta 50% en la tendencia a la volcadura, en tanto que una mejora limitada a la rigidez de la suspensión y llantas, podría significar un margen del 20% en dicha tendencia. Sin embargo, las mejoras en el desempeño de los vehículos resultaron ser una función de las características estimadas como indicadores de la propensión a la volcadura (aceleración lateral, ángulo de oscilación longitudinal, velocidad angular de oscilación longitudinal y transferencia lateral de carga).

El análisis de la normatividad nacional reveló que es una adaptación de algunos de los contenidos de la normatividad estadounidense, exhibiendo algunos aspectos que deberían revisarse y corregirse. En cuanto a los aspectos recomendados a ser revisados en las normas nacionales, están incluir mayores detalles acerca de las especificaciones de materiales, y de los arreglos de los toneles. Asimismo, de otras especificaciones de autotanques (los aislados térmicamente y los de muy alta presión).

La normatividad nacional debería actualizarse, atendiendo los requerimientos en las normas estadounidenses, complementándolos con las recomendaciones planteadas en el presente trabajo, las cuales coinciden, en algunos aspectos con las propuestas por investigadores en los Estados Unidos. Adicionalmente, tal normatividad nacional debería incluir lo que aquí se aconseja acerca de los dos niveles de protección necesarios, y las tolerancias asociadas.

Como resultado de la carencia de restricciones o estipulaciones en el diseño de las protecciones, existe en circulación una variedad importante de modelos. Del análisis respectivo se propone un diseño conceptual, el cual podría mejorar la protección brindada, al consistir en componentes de impacto que son oblicuos con respecto a los cuerpos contra los cuales se golpea el vehículo en una volcadura. Asimismo, el diseño considera dos niveles de protección: el más interno o primario, y el externo o secundario.

Las características de desempeño que deberían satisfacer los vehículos, se fijaron con base en simulaciones de volcaduras de autotanques totalmente llenos, realizadas en una institución especializada (Instituto del Transporte de la Universidad de Michigan, UMTRI). Esta especificación se refiere a la magnitud de la velocidad de impacto que esos dispositivos pudieran resistir en las tres direcciones de movimiento. Adicionalmente, las especificaciones propuestas en este trabajo sobre las velocidades de impacto de diseño, se respaldaron en el 85 percentil de las velocidades de impacto resultantes para autotanques del tipo unitario (no articulados). De esta manera, su implantación daría una buena probabilidad de que el dispositivo de protección resista el impacto asociado a una volcadura.

El análisis de las regiones de impacto en el tonel mostró las áreas que sufren los mayores impactos, tanto en número como en severidad. La intensidad del impacto se estableció como la resultante de la velocidad del punto de impacto en las tres direcciones, obtenidas de las simulaciones en el UMTRI.

Se presupone que la descripción del proceso de diseño conceptual mejoró el proceso de diseño expuesto en este trabajo, ubicando sus diferentes fases.

Como trabajos futuros se sugieren: 1) el desarrollo de un modelo matemático para simular la volcadura, incluyendo las etapas posteriores, de rodadura, del

vehículo sobre la superficie de impacto; y 2) el desarrollo de un modelo del comportamiento de los toneles ante los impactos, atendiendo las cargas dinámicas ligadas a las volcaduras.

Referencias

- Cebon, D, *Handbook of Vehicle-road Interaction*. Swetz and Zeitlinger (1999)
- Dieter, G, *Engineering Design. A Materials and Processing Approach*, Mc Graw-Hill, New York (1983)
- DOT. "Specifications for Packaging". Title 49. Code of Federal Regulations Pt 178.345. 2001 ed. (2001)
- El-Gindy, M, "Overview of Performance Measure for Heavy Commercial Vehicles in North America", *Int J of Vehicle Design*, Vol 16, No 2, pp 187-209 (1995)
- Ervin, R D, Mallikarjunarao, C, Gillespie, T D, "Future Configurations of Tank Vehicles Hauling Flammable Liquids in Michigan". Vol I. Final Report. Highway Safety Research Institute, Ann Arbor, MI, 1980, 243 p UM-HSRI-80-73-1 (1980)
- Gillespie, T D, y MacAdam, C C, "Constant Velocity Yaw-roll Program User's Manual", UMTRI-82-39 (1992)
- Kang, X, Rakheja, S, y Stiharu, I, Tank Shape Optimization for Enhancement of Roll Stability of Partially-filled Tank Vehicles in Steady Turning, presented at ASME IMECE-2000, Orlando, Florida, Nov 2000
- Mayenburg M, Patterson, C y Rossow, G, "Truck Safety Technology for the 21st Century", *Truck Safety: Perceptions and Reality*, Memorias de Congreso, Toronto, pp 83-114 (1996)
- NTSB, "Cargo Tank Rollover Protection". Special Investigation Report Washington, DC, 1992, 58 p NTSB/SIR 92/01. PB92-917002 (1992)
- Noll, G, "The Gasoline Tank Truck Design and Construction", *Fire Engineering*, Junio 1987, pp 39-42 (1987)
- NOM, "Protección contra volcaduras", NOM-020-SCT2/1995 "Requerimientos generales para el diseño y construcción de autotanques destinados al transporte de materiales y residuos peligrosos, especificaciones SCT 306, SCT 307 y SCT 312" (1995)
- Romero, J A, Rakheja, S, Ahmed, A K W, y Lozano, A, "Restrained Cargo Dynamics in Road Transportation: Indirect Tiedowns", *Heavy Vehicle Systems. Int Journal of Vehicle Design*, Vol 9, No 2, pp 93-114 (2002)

Sankar, S, Sankar, T S, y Popov, G, “Dynamics of Liquid Sloshing in Elliptical Road Containers”, Memorias Canadian Society of Mechanical Engineers Conference 1992, Montreal (1992)

Strandberg, L, “Lateral Stability of Road Tankers”, VTI Report No 138A, Sweden, Vol 1 (1978)

Sweet, D, “Safety Harmonization and Competitiveness”, Truck Safety: Perceptions and Reality, Memorias de Congreso, Toronto, pp 121-128 (1996)

Winkler, C Bogard, S, y Zhou, J, “The Dynamics of Tank-vehicle Rollover and the Implications for Rollover Protection Devices”. UMTRI – 98-53 (1998)



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

**Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx**