



Análisis bidimensional de la estabilidad de vehículos pesados tipo carro-tanque

Two-dimensional stability analysis of heavy tank-truck vehicles

Gonzalo Moreno^{1a}, Juan Carlos Serrano^{1b}, Simón Figueroa-Salgado^{1c}

¹Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona-GIMUP, Universidad de Pamplona, Colombia. Orcid: ^a 0000-0003-3617-1381, ^b 0000-0002-9836-6603. Correos electrónicos:

^a gmoren@unipamplona.edu.co, ^b jcserrano@unipamplona.edu.co, ^c sjfigueroa@unipamplona.edu.co

Recibido: 12 enero, 2020. Aceptado: 16 marzo, 2020. Versión final: 27 abril, 2020.

Resumen

En el presente trabajo se realiza el análisis de la estabilidad de vehículos pesados tipo carro-tanque. Para dicho propósito se utiliza el factor denominado umbral de vuelco estático (Static Rollover Threshold, por las siglas en inglés SRT), el cual permite evaluar la máxima fuerza inercial aplicada lateralmente que puede soportar el vehículo antes de iniciar el proceso de vuelco. Adicionalmente, este factor permite determinar la máxima velocidad que el vehículo puede desarrollar al recorrer una curva, dando de esta manera mayor seguridad para los usuarios de la vía. Teniendo en cuenta estos aspectos, se estudia la estabilidad de un carro-tanque de sección transversal circular, ya que para vehículos que transportan líquidos la estabilidad es más crítica, debido a que se debe tener en cuenta el movimiento del fluido transportado cuando es sometido a una aceleración lateral, lo cual puede disminuir el factor de estabilidad. Por consiguiente, para determinar el factor de estabilidad se realiza un análisis detallado del movimiento del fluido como función de la aceleración y el llenado del tanque y se utiliza el método de Davies para el análisis cuasi-estático de la estabilidad del vehículo.

Palabras clave: carro-tanque; factor de estabilidad; umbral de vuelco estático; seguridad vial.

Abstract

The present work makes the stability analysis of the heavy tank-truck vehicles. For this purpose, the so-called Static Rollover Threshold (SRT) is used, which allows evaluating the maximum laterally inertial force applied that the vehicle can support before starting the rollover process. Additionally, this factor allows determining the maximum speed that the vehicle can develop when making a curve, thus providing greater safety for road users. Taking into account these aspects, the stability of tank vehicles with circular cross-section is studied, since for vehicles that transport liquids the stability is more critical, because it must take into account the movement of the transported fluid when it is submitted to a lateral acceleration, which can decrease the stability factor. Therefore, to determine the stability factor, a detailed analysis of the movement of the fluid as a function of the acceleration and filling of the tank is performed and the Davies method is used for the quasi-static analysis of the stability of the vehicle.

Keywords: tank-truck vehicle; stability factor; static rollover threshold; road safety.

1. Introducción

En la actualidad la estabilidad de vehículos pesados es utilizada como uno de los principales referentes para

poder determinar las velocidades límites con las cuales este tipo de vehículos pueden transitar de forma segura por determinados tramos de las vías [1], [2], [3]. En este



sentido, los principales modelos de estabilidad desarrollados utilizan cargas fijas para determinar el factor de estabilidad o Static Rollover Threshold (SRT) [4], [5], [6]. Sin embargo, para varios investigadores es importante determinar como el porcentaje de llenado de los carro-tanques y el movimiento del fluido transportado pueden afectar el cálculo del factor de estabilidad [7], [8], [9].

El presente artículo presenta las siguientes secciones: en la segunda sección se hace un análisis bidimensional del movimiento lineal del fluido bajo la acción de una aceleración lateral, en la tercera sección se hace un análisis bidimensional de la estabilidad de un carro-tanque, lo que permite definir un factor de estabilidad para este tipo de vehículos, en la cuarta sección se realiza un estudio de caso en el que se varía el nivel de llenado del tanque, y por último se detallan las conclusiones del trabajo realizado.

2. Movimiento del fluido con aceleración uniforme

Las ecuaciones que describen el movimiento lineal de un fluido incompresible dentro de un tanque circular sometido a aceleración uniforme como el mostrado en la Figura 1, son las ecuaciones de continuidad y la ecuación de conservación de momentum [10] (Ecuación 1 y 2).

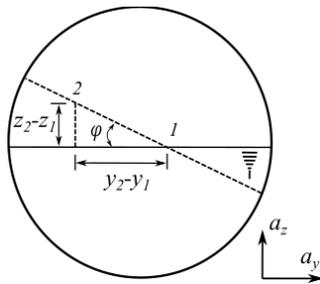


Figura 1. Fluido en aceleración en tanque de sección transversal circular.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

y

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

Donde \mathbf{v} es la velocidad del fluido [m/s], P es la presión del fluido [Pa], ρ es la densidad del fluido [kg/m³], μ es la viscosidad del fluido [Pa·s] y \mathbf{g} es la aceleración debida a la gravedad [m/s²]. Cuando el fluido es sometido a una aceleración lateral, cada elemento del fluido en el tanque experimenta la misma aceleración, además su velocidad

\mathbf{v} es función del tiempo más no de la posición, la Ecuación (2) puede ser reescrita como:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3)$$

Donde D/Dt es la derivada substancial. Para un flujo uniformemente acelerado $\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{a}$ y $\nabla^2 \mathbf{v} = 0$, lo cual reduce la Ecuación (3) a

$$\rho \mathbf{a} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

La Ecuación (4) puede ser expresada explícitamente como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \vec{k} + \rho \mathbf{g} \vec{k} \\ = -\rho (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \end{aligned} \quad (5)$$

Considerando el movimiento del fluido en el plano y - z , la Ecuación (5) se reduce a:

$$dP = -\rho a_y dy - \rho (g + a_z) dz \quad (6)$$

Cuando un tanque es uniformemente acelerado en la dirección y , inicialmente la superficie libre se moverá hacia atrás y adelante, después de algún tiempo este movimiento desaparece, pasando de este estado transitorio a un movimiento uniformemente acelerado.

La posición de la superficie del líquido en un tanque uniformemente acelerado es mostrada en la Figura 1. Para $\rho = cte$, la diferencia de presión entre dos puntos 1 y 2 en el fluido es determinada por integración, con lo que la Ecuación (6) se transforma en:

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 = -\rho a_y (y_2 - y_1) \\ - \rho (g + a_z) (z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (7)$$

El aumento vertical de la superficie libre en el punto 2 relativo al punto 1 puede ser determinado seleccionando estos puntos sobre la superficie libre donde $P_2 = P_1$ y solucionando la Ecuación (7)

$$\Delta z = z_2 - z_1 = -\frac{a_y}{g + a_z} (y_2 - y_1) \quad (8)$$

En un fluido incompresible con aceleración uniforme en movimiento lineal, las líneas de presión constante son

paralelas a la superficie cuya pendiente en el plano y - z con $a_z = 0$ puede ser determinada mediante:

$$\text{pendiente} = -\frac{a_y}{g + a_z} = -\frac{a_y}{g} = \tan \varphi \quad (9)$$

Con el objetivo de determinar el centro de gravedad del fluido (CG_2) de un tanque de sección transversal circular, sometido a aceleración uniforme y con determinado porcentaje de llenado, las coordenadas del centro de gravedad se determinan mediante la solución de:

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \iint_A x dA \quad (10a)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \iint_A y dA \quad (10b)$$

La Figura 2, muestra la variación del (CG_2) para diferentes porcentajes de llenado (40%, 50% y 60%) en función de la aceleración $0 \leq a_y \leq 0.3g$. Se observa que, para mayores aceleraciones, el (CG_2) se mueve hacia atrás y hacia arriba en forma pendular [11], también se observa que con menores porcentajes de llenado el (CG_2) presenta una mayor oscilación, lo cual influye en la estabilidad del vehículo.

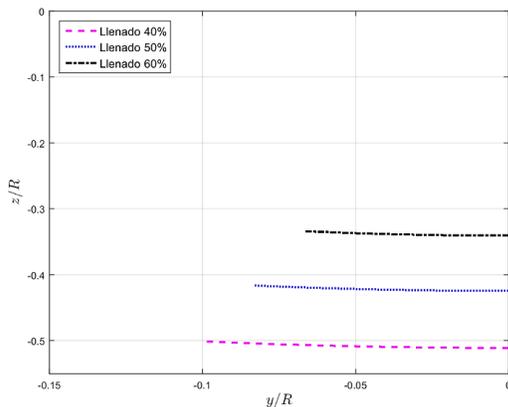


Figura 2. Movimiento del CG_2 como función del llenado del tanque y la aceleración

3. Análisis de estabilidad del vehículo

Para este análisis se utilizó la representación bidimensional de un carro-tanque (Figura 3), en este se puede observar que el vehículo tiene un centro de gravedad fijo (CG_1), que corresponde al peso no móvil del vehículo (w_1), y un centro de gravedad móvil (CG_2), que corresponde al peso móvil del líquido transportado

(w_2), se asume por lo especificado en la sección 2 que el movimiento del fluido es lineal. Con el objetivo de poder observar el movimiento del peso fijo del vehículo (CG_1), se asumió en las figuras una altura en proporción 2:1.

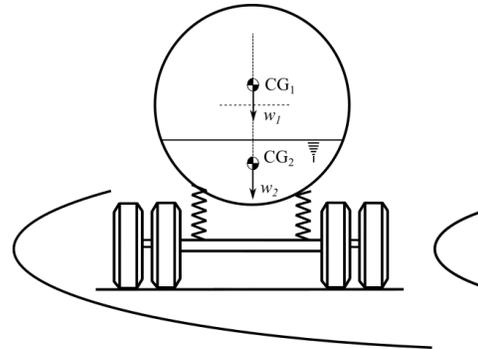


Figura 3. Carro-tanque.

En la Figura 4 se puede observar que inicialmente cuando el vehículo realiza un giro hacia la derecha, aparecen las fuerzas centrípetas (m_1a_y y m_2a_y) en los centros de gravedad, estas fuerzas hacen que el vehículo por acción de la rigidez de los neumáticos y de la suspensión se incline un ángulo θ , lo cual ocasiona el movimiento del CG_1 en torno al centro de rotación del vehículo (CR), y del CG_2 el cual realiza un movimiento similar al de un péndulo en torno al centro geométrico del tanque.

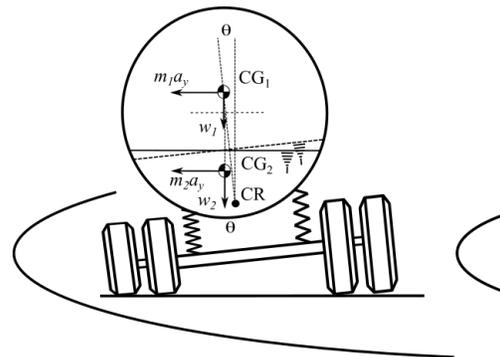


Figura 4. Carro-tanque, bajo la acción del ángulo de inclinación (θ).

Adicionalmente, y como se observa en la Figura 5, el centro de gravedad de la carga móvil del vehículo (CG_2) se desplaza un ángulo mayor (θ_1), primero debido a la inclinación del vehículo (Figura 4) y segundo debido al movimiento lineal del fluido transportado.

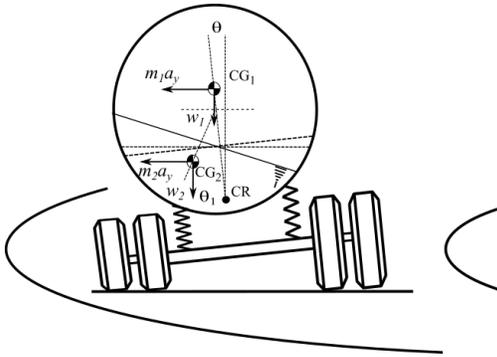


Figura 5. Carro-tanque, bajo la acción del movimiento del fluido transportado.

Teniendo en cuenta estas especificaciones de movimiento de los centros de gravedad, y haciendo un desarrollo similar al expuesto en [12], en el cual se emplea el Método de Davies como herramienta de análisis se puede obtener el factor de estabilidad del vehículo (SRT) y las fuerzas que actúan en cada uno de los sistemas de este (suspensión y neumáticos).

Del análisis realizado y tomando momentos en el punto A (Figura 6) se obtiene Ecuación (11).

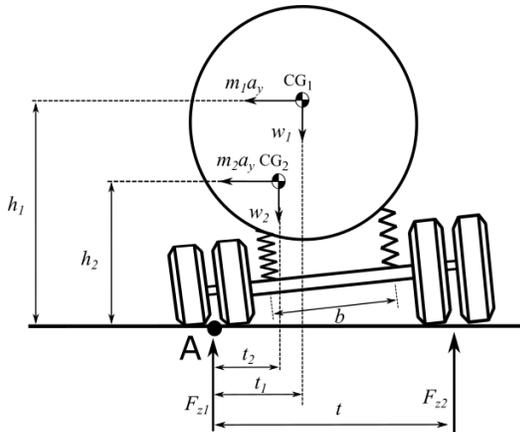


Figura 6. Análisis de estabilidad.

$$w_1 t_1 + w_2 t_2 - m_1 a_y h_1 - m_2 a_y h_2 - F_{z2} t = 0 \quad (11)$$

De la Ecuación 11 se tiene que: t_1 es la distancia lateral desde el punto de apoyo de la rueda externa a la curva hasta en CG_1 , t_2 es la distancia lateral desde el punto de apoyo de la rueda externa a la curva hasta el CG_2 , h_1 es la altura del CG_1 , h_2 es la altura del CG_2 , t es la distancia lateral entre las ruedas o ancho de vía, b es la distancia lateral de separación de la suspensión, y F_{z_i} son las fuerzas normales de apoyo del vehículo.

Teniendo en cuenta que, en el umbral de vuelco dinámico del vehículo, la fuerza de apoyo de la rueda interna a la curva tiende a cero ($F_{z2} = 0$), de la Ecuación 11 se tiene:

$$m_1 g t_1 + m_2 g t_2 - m_1 a_y h_1 - m_2 a_y h_2 = 0 \quad (12)$$

Reorganizando esta ecuación se tiene que el factor de estabilidad bidimensional para un vehículo tipo carro-tanque se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$SRT = \frac{a_y}{g} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 h_1 + m_2 h_2} \quad (13)$$

Esta ecuación nos indica que el factor de estabilidad no depende únicamente de la posición de los centros de gravedad, sino que también es función del peso fijo del vehículo y del peso del líquido transportado.

4. Caso de estudio

Para este análisis se utilizó un vehículo pesado tipo carro-tanque con las especificaciones relacionadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del vehículo.

Vehículo pesado – carro tanque		
Parametro	Valor	Unidad
Peso del vehículo vacío (w_1)	60	kN
Peso del líquido transportado (w_2) – (agua)	407.66	kN
Rigidez combinada de la suspensión (3 ejes)	5400	kN/m
Rigidez combinada de los neumáticos	5040	kN/m
Distancia lateral entre las ruedas o ancho de vía (t)	1.86	m
Diametro del tanque	1.015	m
Altura inicial del CG_1 (h_1)	0.85	m
Altura inicial del centro geométrico del tanque	2.125	m
Distancia lateral de separación de la suspensión (b)	0.95	m

Fuente: elaboración propia.

Para la simulación del modelo se tuvo en cuenta la norma ISO-14792 – Steady State Circular Test [13], y se calculó el factor de estabilidad hasta que la transferencia de carga lateral fue completa (todo el vehículo quedó apoyado en la rueda externa a la curva).

En la Figura 7 se puede observar cómo inicialmente la estabilidad del vehículo es bastante alta, pero conforme el tanque es llenado y el peso del líquido (w_2) aumenta, el factor de estabilidad disminuye notoriamente, ya que

la altura de su centro de gravedad (h_2) va aumentando gradualmente. Adicionalmente se puede observar como el ángulo de inclinación o de vuelco del vehículo debido a la acción de la rigidez de la suspensión y de los neumáticos (Body roll angle - θ) aumenta con el llenado del tanque.

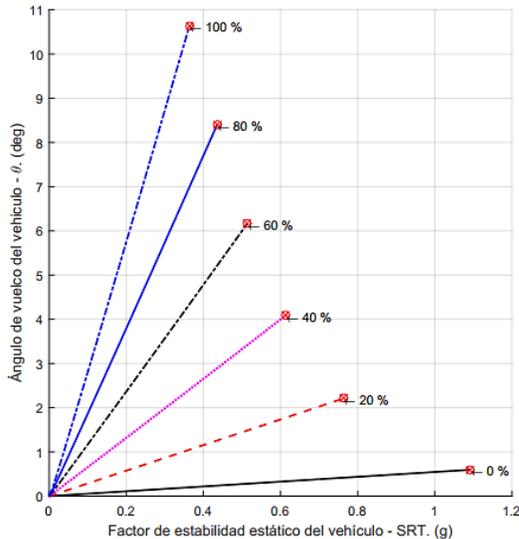


Figura 7. Factor de estabilidad.

Sin embargo si se aumenta la distancia de separación lateral de la suspensión (b) de 0.95 m a 1.062 m, el ángulo de inclinación disminuye y la estabilidad aumenta alrededor de 1.2%, como se indica en la Figura 8.

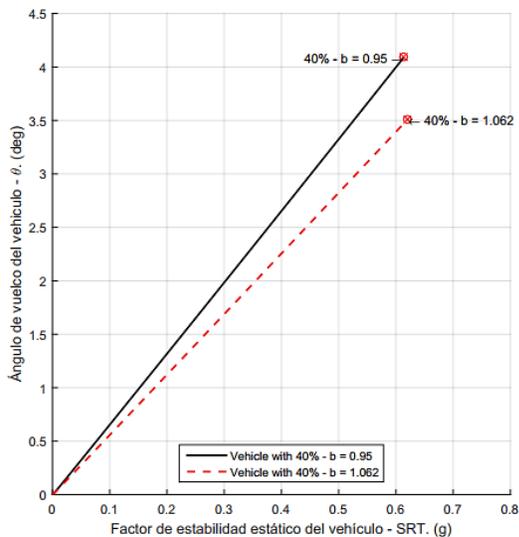


Figura 8. Distancia lateral de la suspensión.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se determinó el factor de estabilidad para vehículos tipo carro-tanque, en el cual se puede evidenciar que este factor no es solo función de la ubicación del centro de gravedad del vehículo, si no también es función del peso fijo y móvil del vehículo.

En los resultados de la prueba realizada, se pudo evidenciar que conforme el vehículo va adquiriendo mayor carga, la estabilidad va decreciendo, esto se debe a que la altura (h_2) del centro de gravedad del peso líquido del vehículo va aumentando.

Adicionalmente, se determinó que la estabilidad de los vehículos se puede incrementar, si se utilizó una mayor distancia lateral en la instalación de los muelles de la suspensión.

Referencias

- [1] G. Moreno, L. C. Nicolazzi, R. D. S. Vieira, D. Martins, "Stability of long combination vehicles," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 113-131, 2018, doi: 10.1504/IJHVS.2018.089897
- [2] R. Rajagounder, G. V. Mohanasundaram, P. Kalakkath, "A study of liquid sloshing in an automotive fuel tank under uniform acceleration," *Engineering Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 71-85, 2016, doi: 10.4186/ej.2016.20.1.71
- [3] G. Moreno, R. Vieira, D. Martins, "Highway designs: effects of heavy vehicles stability," *Dyna*, vol. 85, no. 205, pp. 205-210, 2018, doi: 10.15446/dyna.v85n205.69676
- [4] Y. He, M. M. Islam, "An automated design method for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles," *Journal of Mechanical Design*, vol. 134, no. 4, pp. 041002, 2012, doi: 10.1115/1.4006047
- [5] G. Rill, "Road vehicle dynamics: fundamentals and modeling," Cleveland, OH, USA: CRC Press, 2011.
- [6] Y. He, X. Yan, D. Chu, C. Wu, Z. Chen, "Contribution of wind forces to rollover stability of heavy duty vehicle," *In 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Jun 2015, pp. 173-176, doi: 10.1109/ICTIS.2015.7232130
- [7] R. Ranganathan, "Rollover threshold of partially filled tank vehicles with arbitrary tank geometry," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 207, no. 3, pp. 241-244, 1993, doi: 10.1243/PIME_PROC_1993_207_185_02

[8] C. Winkler, "Rollover of Heavy Commercial Vehicles," *UMTRI Rese.arch Review, The University of Michigan Transportation Research Institute*, vol. 31, no. 4, pp. 1-20, 2000.

[9] H. Prem, L. Mai, L. Brusza, "Tilt testing of two heavy vehicles and related performance issues," *In International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*, 9th, June-2006.

[10] A. Çengel Yunus, M. Cimbala, "Fluid Mechanics Fundamentals and Applications," *Editorial McGraw-Hill*, 2006.

[11] A. Dasgupta, "Effect of tank cross-section and longitudinal baffles on transient liquid slosh in partly-filled road tankers," PhD-thesis, Concordia University, 2011.

[12] G. Moreno, L. C. Nicolazzi, R. D. S. Vieira, D. Martins, "Suspension and tyres: stability of heavy vehicles," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 305-326, 2017, doi: 10.1504/IJHVS.2017.087221

[13] Heavy commercial vehicles and buses - steady state circular tests- International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, ISO-14792, 2011.