

LA ESTABILIDAD DE VEHICULOS PESADOS Y LA SEGURIDAD EN CARRETERAS

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Publicación Técnica No. 117
Sanfandila, Qro. 1999

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues-Galindo
76700 P. Escobedo, Gro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71
Internet <http://www.imt.mx>

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

**La estabilidad de vehículos pesados y
la seguridad en carreteras**

**Publicación Técnica No. 117
Sanfandila, Qro., 1999**

Presentación

Este documento fue elaborado por Alejandro Lozano Guzmán, José Ricardo Hernández Jiménez y José Antonio Romero Navarrete, bajo la coordinación de Alejandro Lozano Guzmán.

Se contó con el apoyo del Coordinador de Equipamiento para el Transporte, Dr. Miguel Martínez Madrid, para la publicación de este trabajo.



Indice

	<i>Página</i>
Resumen.	VII
Abstract.	IX
Resumen ejecutivo.	XI
1. Introducción.	1
2. Estabilidad. Factores que afectan la estabilidad de los vehículos pesados.	5
3. Simulación de los vehículos.	13
4. Análisis de los vehículos y discusión de factores que afectan la seguridad.	19
5. Conclusiones.	39
Referencias.	41

Resumen

La estabilidad de los vehículos pesados, se ve afectada por las condiciones mecánicas y de operación de los mismos. Por lo anterior, se requiere evaluar la influencia que tienen estas condiciones de operación y los parámetros mecánicos de los componentes de los vehículos en su desempeño, especialmente en situaciones que pueden conducir a accidentes.

En este trabajo se presentan de manera general los conceptos que definen la estabilidad de vehículos pesados, la metodología para su análisis y se revisa por medio de simulación en computadora la influencia que diversos componentes y configuraciones de este tipo de vehículos tiene en su operación. Asimismo, para resaltar el impacto que los accidentes que involucran a vehículos pesados en carreteras tienen sobre el costo de operación del transporte, se presentan algunos datos estadísticos sobre los accidentes que involucran este tipo de vehículos.



Abstract

Stability of heavy duty vehicles, is modified by the mechanical and operational conditions of these kind of vehicles. Due to this fact, it is necessary to assess the vehicle's performance under different conditions, specially under circumstances which might lead to an accident.

In this work, a general overview of the heavy duty vehicles stability concepts is presented. A methodology for studying this stability problem is outlined and computer modeling and simulation results are used to analyzed vehicle's performance. In order to point out the economic importance of the heavy duty vehicles stability related accidents, some statistical data is also presented.



Resumen ejecutivo

Entendiendo como la condición de inestabilidad de un vehículo aquella en la que la conducción y operación del mismo ya no es controlable por su operador, la inestabilidad de un vehículo puede producir su volcadura o su deslizamiento fuera o dentro del camino. De esta manera, la estabilidad de los vehículos pesados implica el estudiar el comportamiento dinámico de éstos ante perturbaciones provenientes del mismo vehículo o de la carretera. Estudiar la respuesta del vehículo ante maniobras evasivas o durante un frenado de emergencia, constituyen dos aspectos fundamentales en el estudio de estabilidad de los vehículos.

Teniendo como objetivo presentar un panorama general de los aspectos relacionados con la estabilidad de los vehículos pesados, en el presente trabajo se discuten los conceptos fundamentales del tema, describiendo la importancia de los accidentes en el contexto de la seguridad de las carreteras. Como introducción se presentan estadísticas de los volúmenes de tránsito y capacidad de transporte de México, comparativamente con Canadá y Estados Unidos, estimando el costo de los accidentes en los que vehículos pesados se ven involucrados. A partir de esta introducción, posteriormente se describen los factores que afectan la estabilidad de los vehículos pesados. De esta manera, los grados de libertad de un vehículo articulado son descritos, así como conceptos tales como rigidez al giro, rigidez vertical y defasamiento del centro de gravedad. Se presenta la respuesta del vehículo como función de la presión en el sistema de frenos, mediante el empleo de curvas típicas. Asimismo, en forma general, se describe el programa de cómputo empleado.

En este reporte, se presentan simulaciones numéricas del efecto que tienen diferentes componentes del vehículo en su desempeño. Las simulaciones comprenden tres tipos de vehículos : uno unitario, otro simplemente articulado y un tercero, doblemente articulado. El efecto de la sobrecarga sobre el comportamiento de estos tipos de vehículos, es analizada en cuanto a las siguientes pruebas : frenado con desaceleración constante, despiste a alta y baja velocidad, umbral de volcadura y maniobrabilidad. Al respecto y de acuerdo a los resultados obtenidos, se observan importantes diferencias al comparar los resultados a distintos niveles de carga. Para el caso del frenado con desaceleración constante, el efecto con sobrecarga, a pesar de que ésta induce una mayor eficiencia de frenado, globalmente provoca una mayor distancia de frenado. El efecto más importante de la sobrecarga se observa en la inestabilidad de los vehículos al efectuar una maniobra de evasión de obstáculo (llamada prueba de maniobrabilidad) donde la sobrecarga implica un retraso importante en el tiempo de respuesta de los componentes involucrados del vehículo, implicando serias afectaciones a la seguridad de los vehículos.

1. Introducción

Entendiendo la seguridad en las carreteras como la minimización del número de accidentes, parece clara la relación que existe entre la estabilidad de vehículos pesados y el efecto que esto tiene en un buen número de percances en las carreteras. No obstante, en general, no se cuenta con datos objetivos para cuantificar la influencia que, por ejemplo, tienen unas llantas en mal estado en un accidente. De manera similar se tiene la sensación de que un vehículo sobrecargado es menos seguro, pero nuevamente la evaluación objetiva, de qué tanto más peligroso es que un vehículo en estas condiciones circule por la carretera, no es inmediata.

De lo anterior surge la necesidad de cuantificar el efecto que una serie de características mecánicas y operativas de los vehículos de transporte de carga tienen sobre situaciones que pueden conducir a accidentes. Para esto, en este trabajo se presentan de manera general los conceptos que definen la estabilidad de vehículos pesados, la metodología para su análisis y se revisa, por medio de simulación en computadora, la influencia que diversos componentes y configuraciones de este tipo de vehículos tiene en su operación. Asimismo, para resaltar el impacto que los accidentes que involucran a vehículos pesados en carreteras tienen sobre el costo de operación del transporte, se presentan algunos datos estadísticos sobre los accidentes que involucran este tipo de vehículos.

Según datos del Departamento del Transporte de los Estados Unidos [1], la distribución de vehículos de carga en México, Canadá y Estados Unidos es la siguiente:

Tabla 1. Distribución de vehículos pesados en México, Canadá y Estados Unidos.

PAIS	TRACTOCAMIONES		CAMIONES	
México	264,448	(16.6%)	841,059	(14.7%)
Canadá	87,283	(5.5%)	269,253	(4.7%)
Estados Unidos	1,240,309	(77.9%)	4,614,028	(80.6%)
Total	1,592,040	(100.0%)	5,724,341	(100.0%)

De los casi seis millones de vehículos de carga existentes en Estados Unidos, se reporta [2], que en 1992 hubo 139,000 accidentes que involucraron vehículos pesados. De estos, 4,185 tuvieron como consecuencia la muerte de al menos una persona, en 57,000 de ellos se requirió atención médica mayor para por lo menos una persona y en 78,000

accidentes, sólo se reportaron daños materiales que requirieron que al menos uno de los vehículos involucrados fuera remolcado. Se reporta también que en estos accidentes murieron 521 choferes y que el 69% de estas muertes ocurrió sin que en el percance del camión de carga interviniera ningún otro vehículo. De estos datos, resalta el hecho de que del total de accidentes, sólo en 1.3% de ellos se detectó que el conductor hubiera estado bajo los efectos del alcohol o de algún tipo de droga, esto comparado con el 5.6% de este tipo de casos, que se presenta con conductores de automóviles. De los accidentes graves, en la tabla 2 se muestra el tipo de vehículo de carga que estuvo involucrado en el mismo.

Tabla 2. Número de accidentes graves en Estados Unidos, por tipo de vehículo pesado.

año	Camión		Tractor-Semiremolque		Tractor-Semiremolque-remolque		Desconocido		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
1988	1,560	28.3	3,574	65.3	236	4.3	116	2.1	5,476	100
1989	1,561	29.5	3,436	64.8	220	4.2	83	1.6	5,300	100
1990	1,477	29.5	3,241	64.7	203	4.0	92	1.8	5,013	100
1991	1,341	29.7	2,857	64.6	175	4.0	74	1.7	4,420	100
1992	1,257	30.0	2,660	63.6	189	4.5	79	1.9	4,185	100

De los datos anteriores se puede apreciar que en 1992 el 48% de los vehículos de carga involucrados en los accidentes fueron de los denominados *camiones*, esto es, del tipo C2 y C3 y el 51% fueron conjuntos vehiculares articulados. A su vez, de los accidentes más graves, esto es de los 4,185 que involucraron pérdida de vidas humanas, en el 30% de ellos participaron *camiones*, en el 63.6% conjuntos vehiculares tractor-semiremolque, en el 4.5% de accidentes participaron conjuntos vehiculares de más de dos unidades tipo tractor-semiremolque-remolque y en el 1.9% del total no se registró el tipo de vehículo. De los accidentes graves 202 tuvieron que ver con el transporte de sustancias peligrosas, pero sólo en 30 de ellos hubo derrame de la sustancia transportada. De los datos presentados, es notable una tendencia decreciente en el número de accidentes graves que involucran vehículos pesados de 1988 a 1992, posiblemente relacionada con un mejoramiento tecnológico de los vehículos.

Con base en esta información y sólo para el fin de tener una idea general del costo que representan estos accidentes, tomemos los datos de 1992 y asignemos un costo de 80,000 dólares por cada accidente grave. En esta estimación hay que tomar en cuenta el pago de seguros de vida y vehículos, lo que eleva la cantidad supuesta. A los accidentes en que las víctimas

requieren atención médica mayor se les asigna un costo de 15,000 dólares por accidente y los que sólo involucraron daños materiales un costo de 3,000 dólares. Estas estimaciones se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Costo estimado de los accidentes que involucraron vehículos pesados en Estados Unidos, durante 1992.

No. Accidentes	Costo (dólares)	Intensidad	Total (Millones dólares)
4,185	80,000.00	Grave	334.8
57,000	15,000.00	Regular	855.0
78,000	3,000.00	Leve	234.0

De este cálculo estimado, se tiene que el costo de los accidentes que involucraron vehículos pesados durante 1992 en Estados Unidos fue de \$1,423 millones de dólares. Si ahora hacemos una nueva suposición, ciertamente conservadora, de que el número de accidentes en México es una proporción directa al número de accidentes en Estados Unidos respecto al número de vehículos de carga que existen en ese país, se tendría que para México, tomando en cuenta las 1'100,000 unidades de carga que se reportan, se tuvieron en México alrededor de 26,250 accidentes en los que intervinieron vehículos de carga. Aplicando la misma regla de proporcionalidad mencionada anteriormente, el costo de estos accidentes en México sería de alrededor de 2,000 millones de pesos para los datos de 1992. Las estimaciones anteriores en cuanto al costo son aproximadas, pero dan una idea de la magnitud del problema. Adicionalmente, de las estadísticas disponibles para Estados Unidos, resaltan los hechos de que aproximadamente el 80% de los accidentes ocurrieron sin que hubiera condiciones atmosféricas adversas, manteniéndose esta proporción para los accidentes graves; que el 70% del total de accidentes y el 77% de los graves ocurrieron con el pavimento seco y que el 44% de los accidentes que involucraron vehículos articulados sucedieron en carreteras secundarias. Estos datos sugieren una tendencia muy marcada a identificar las causas del accidente dentro del vehículo mismo, esto es, en su estabilidad, condiciones mecánicas y capacidad de respuesta. De esta manera parece que el estudio de la estabilidad de los vehículos pesados tiene gran importancia para la seguridad en el tránsito carretero. De esta manera, en la siguiente sección se revisan algunos conceptos de lo que significa la estabilidad de vehículos de carga, para después pasar a presentar el impacto que pueden tener algunos de estos conceptos en la causalidad de los accidentes.

2. Estabilidad. Factores que afectan la estabilidad de los vehículos pesados

Cuando hablamos de estabilidad, en general nos referimos a que un vehículo no haga nada impredecible en condiciones normales de manejo, esto es, que se comporte de una manera razonablemente lineal y proporcional a las entradas que reciba. Así, hablar de linealidad y proporcionalidad en la conducción de un vehículo implica que al operar el volante, frenar o acelerar, será uno capaz de seleccionar consistentemente combinaciones de estas operaciones y que como resultado de ellas tendremos la respuesta esperada.

En condiciones normales de operación no es común llevar los vehículos hasta sus límites de desempeño. Sin embargo, desde el punto de vista de la ingeniería, estas condiciones extremas son las que nos indican los límites de estabilidad que se pueden esperar de las diferentes configuraciones de vehículos pesados, tomando en cuenta sus condiciones de operación y características geométricas y mecánicas.

Así, para proceder al análisis de las condiciones de estabilidad de vehículos pesados, se establece la terminología que permite identificar los movimientos que lleve a cabo el camión y que describen las características de sus componentes básicos. En la figura 1, se muestra un sistema de referencia, respecto al cual se definen los momentos de volcadura (roll), de coleo (yaw) y de cabeceo (pitch). Son precisamente estos momentos, los responsables de los accidentes de los vehículos pesados en carretera.

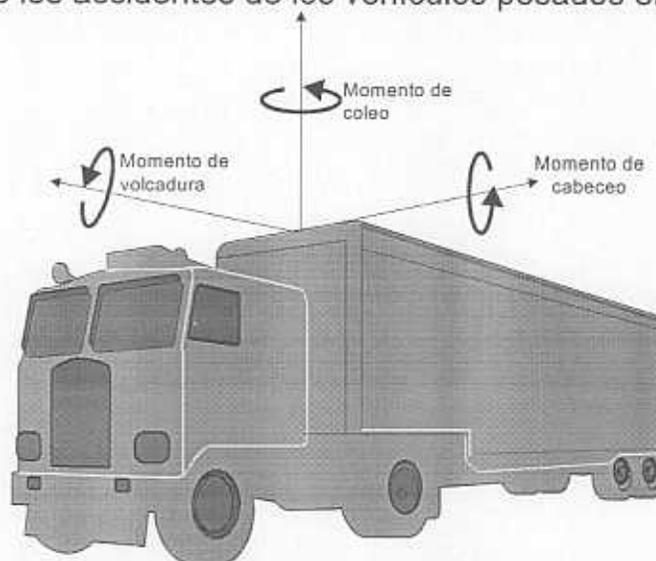


Figura 1. Definición de los momentos de cabeceo, coleo y volcadura de un vehículo de carga.

Respecto a los componentes básicos de los vehículos de carga, es necesario comentar sobre las llantas, las suspensiones, los sistemas de dirección, los sistemas de frenado, los bastidores (chasis) y los dispositivos de acoplamiento. Las llantas de un vehículo pesado, son las que producen las fuerzas que permiten al camión dar vuelta, detenerse o incrementar su velocidad. Estas fuerzas, se generan por la deformación elástica de la estructura de la llanta, esto es, la combinación de las cuerdas y el hule de las mismas. En condiciones normales de operación, las llantas trabajan más o menos en su rango elástico, sin embargo, bajo condiciones extremas, el piso de la llanta desliza con respecto al pavimento y esto limita las fuerzas disponibles para maniobrar el vehículo. Las fuerzas y momentos que se generan en la llanta se representan en la figura 2 y éstas son F_x , relacionada con la fuerza de tracción, F_y fuerza lateral relacionada con la resistencia al giro, el momento de alineamiento M_z y la fuerza vertical F_z , que es función de la deflexión vertical de la llanta. Para fines de análisis del comportamiento de las llantas en los vehículos pesados, una de sus características más importantes es la *rigidez al giro* (C_α), definida como el cociente de la fuerza lateral y el valor del ángulo de deslizamiento α . A partir de esta característica, se define también el *coeficiente de giro*, que relaciona la rigidez al giro con la fuerza vertical.

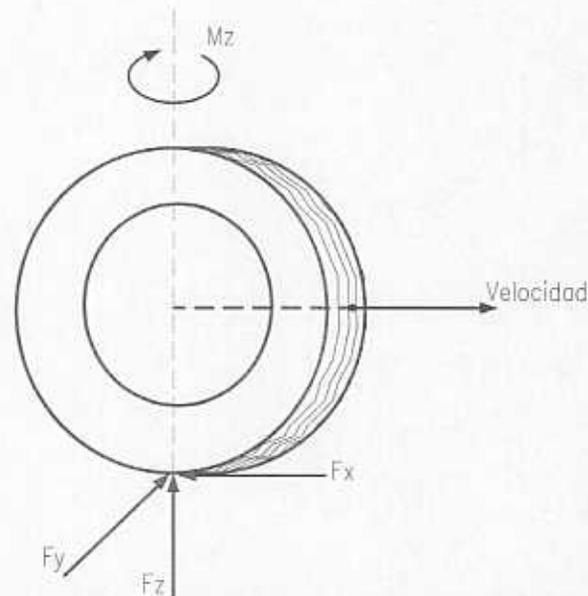


Figura 2. Fuerzas y momentos presentes en la operación de la llanta

En general, el diseño de las suspensiones de los vehículos pesados tienen que cumplir con una serie de requerimientos entre los que destacan, desde luego, su capacidad de llevar carga, minimizar la vibración en la cabina y en el compartimiento de carga del vehículo, esto con un mínimo de costo, peso,

mantenimiento y máximo de duración. Sin embargo, para fines de análisis de la influencia de la suspensión en la dinámica de los vehículos pesados, sólo se considera su capacidad de desempeño en las operaciones de frenado y conducción del vehículo. Así, la importancia de la suspensión en el análisis de estabilidad de los vehículos pesados, se refiere a la relación que exista entre las características de la suspensión y la carga dinámica que transmita a las llantas. En la figura 3, se muestran algunas de las suspensiones de uso más común en los vehículos de carga; estas son básicamente las llamadas suspensiones de muelles, en sus variantes denominadas *de cuatro resortes*, *de viga basculante* y las de aire. No obstante la gran diversidad de los tipos de suspensiones, su comportamiento se puede definir por las siguientes propiedades mecánicas: rigidez vertical, rigidez al giro, amortiguamiento, capacidad de distribución de carga, transferencia de cargas entre ejes durante el frenado, altura del centro de rotación y valor de los coeficientes de giro y elongación por cambio de dirección. De estas propiedades, las más importantes son la altura del centro de rotación y la rigidez al giro, cuyos efectos se ilustran en la figura 4.

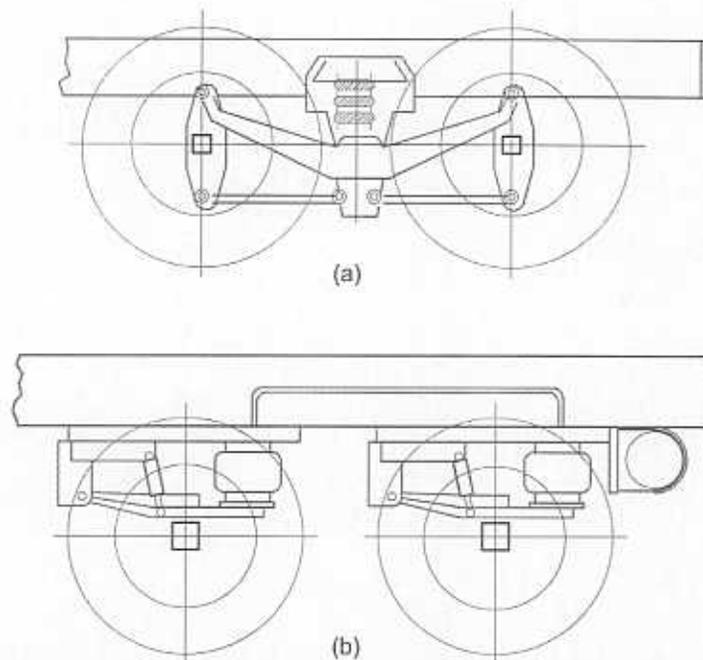


Figura 3. Suspensiones tipo (a) viga basculante y (b) de aire.

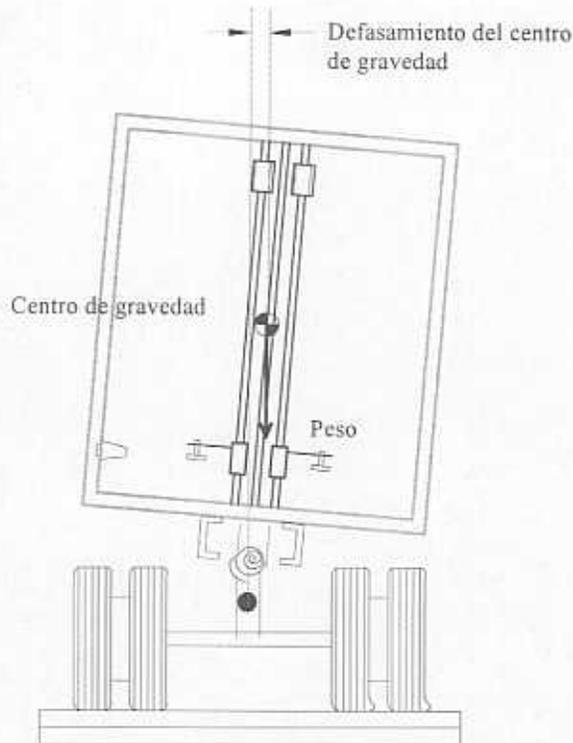


Figura 4. Efecto de defasar el centro de gravedad en el compartimiento de carga.

Los sistemas de dirección son un conjunto de mecanismos a través de los cuales se transforma el movimiento angular del volante de la dirección en un giro respecto a un eje vertical de las llantas delanteras de los vehículos. Para que esta transformación se lleve a cabo correctamente, es necesario tener en cuenta la geometría de las llantas, esto es, su sistema de soporte y la suspensión, así como las tolerancias, la rigidez y la rapidez de respuesta de los diferentes mecanismos. La figura 5, muestra un sistema de dirección típico en un camión de carga. Para el análisis de la estabilidad de vehículos pesados, los parámetros que más afectan la operación del sistema de dirección, son su rigidez lateral, esto a alta velocidad y su comportamiento en condiciones de frenado.

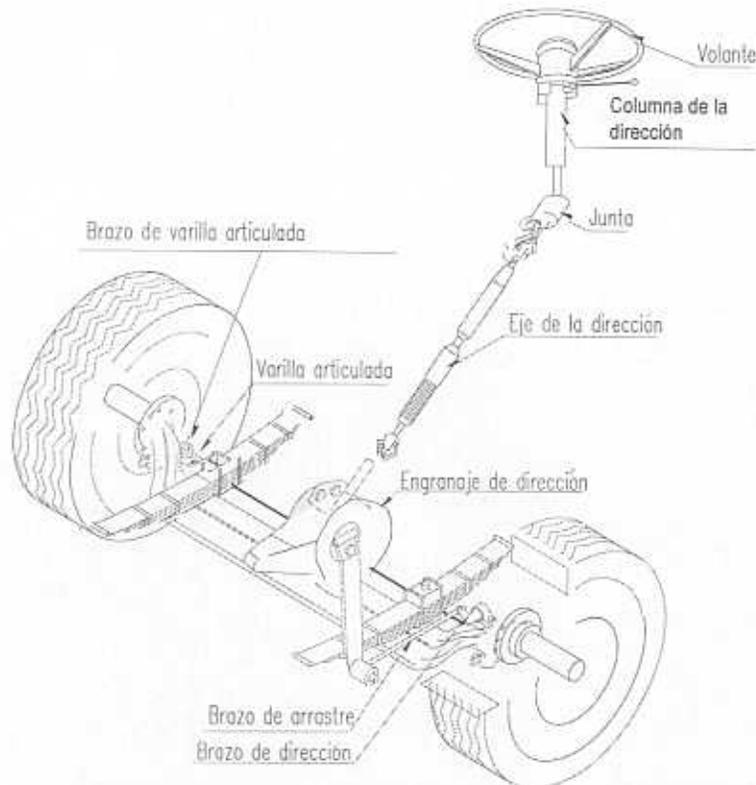


Figura 5. Sistema de dirección típico de un vehículo pesado.

El comportamiento de los frenos en un vehículo pesado, juega un papel fundamental en el análisis de su estabilidad, ya sea en maniobras de frenado normal, al mantener la velocidad de descenso en una pendiente pronunciada o ante un frenado en condiciones de emergencia. Las características de los frenos que más afectan estas maniobras son su efectividad, la variación del par de frenado y su capacidad térmica. En la figura 6, se muestran variaciones típicas de estas características. Aquí se observa que la efectividad o eficiencia del frenado depende del deslizamiento entre las superficies friccionantes, la consecuente elevación de temperatura de los elementos en contacto y la disminución de la fuerza de fricción por esta elevación de temperatura. Esta situación, considerando que se mantiene una presión constante en el pedal de freno, obteniéndose una desaceleración constante de la rueda. La variación del par de frenado, considera la relación entre la presión hidráulica producida por el pedal de freno y el tiempo que tarda en manifestarse la fricción en los elementos de frenado. En la figura 7 se indican valores característicos de presiones de frenado y tiempos de respuesta en una combinación vehicular tractor-semitrailer. Por lo que respecta a la capacidad térmica de los frenos, lo cual tiene relevancia en operaciones de frenado en pendientes largas, depende básicamente de la masa y material de los frenos, así como del flujo de aire que incida sobre ellos.

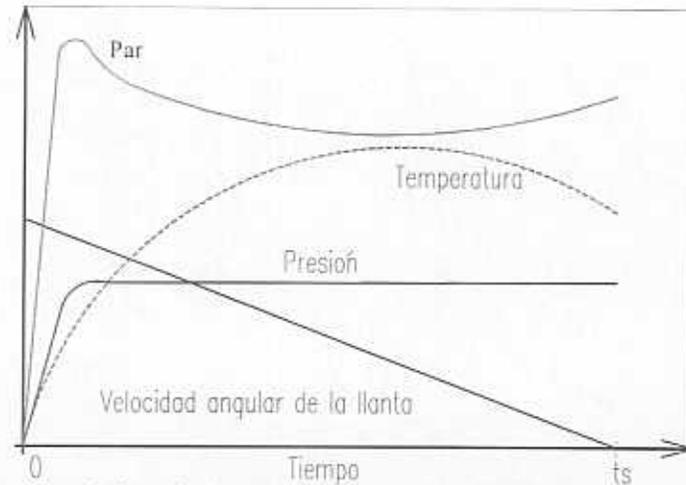


Figura 6. Variación típica de la temperatura de los frenos con respecto al par, presión y velocidad angular

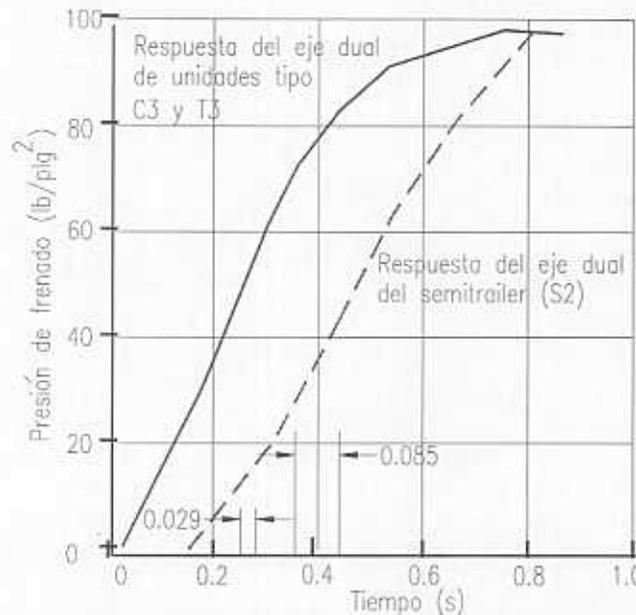


Figura 7. Variación típica de la presión de frenado con respecto al tiempo del sistema de frenos de vehículos de carga tipo C3 y T3S2.

El bastidor o chasis, es el elemento de carga del vehículo, que se apoya en los ejes delantero y trasero del camión. De este elemento se sujetan la mayoría de los componentes del vehículo de carga. Los chasis de estos vehículos normalmente se construyen de perfiles estructurales tipo canal (montén) unidos por elementos transversales de tipos y formas que dependen del uso al que se destine el vehículo. El chasis se diseña básicamente para soportar el momento flexionante producido por la carga, manteniendo una adecuada rigidez torsional para minimizar los esfuerzos. La importancia que tiene el chasis en el comportamiento dinámico de un vehículo pesado, se ha estudiado poco, de tal manera que es importante

analizar el caso de vehículos pesados, en los que el chasis es un contenedor o un tanque (figura 8), este último en muchas ocasiones transportando materiales peligrosos.

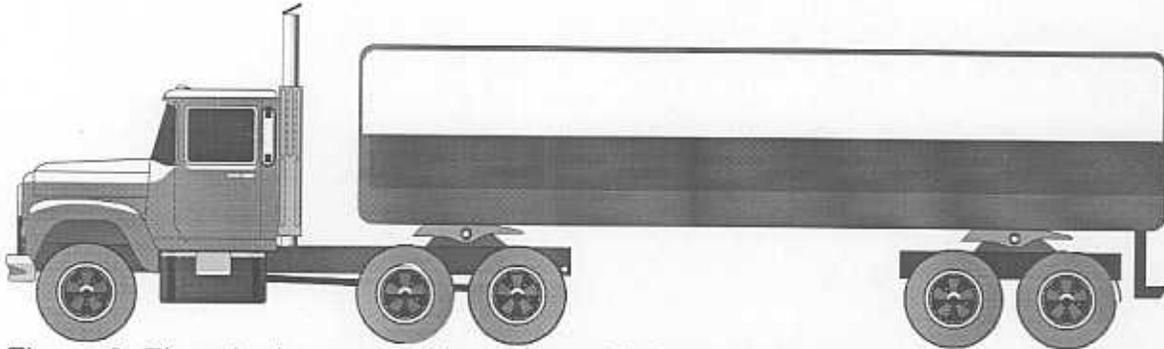


Figura 8. Ejemplo de una configuración vehicular, en la que el tanque es el chasis.

La importancia de los dispositivos de acoplamiento de los vehículos pesados, estriba en que modifican los grados de libertad, esto es, la forma de moverse, de los conjuntos vehiculares tractor, semiremolque, remolque y sus diversas combinaciones. El dispositivo de acoplamiento más común es el llamado *quinta rueda*, que permite que un semitrailer gire alrededor de su unidad tractiva y que tenga cabeceo, pero que no se voltee independientemente, pues esto haría más vulnerable a la volcadura a la caja del semitrailer. Los dispositivos de acoplamiento también influyen en el desempeño del vehículo durante el frenado, pues afectan la transferencia de carga entre ejes. Este efecto se ha ido minimizando al extenderse más el empleo de los sistemas de frenos antibloqueo.

3. Simulación de los vehículos

Tomando en cuenta que el costo de una prueba de estabilidad de un vehículo pesado es elevado (del orden de \$20,000) y que para caracterizar un tipo de vehículo se requiere efectuar una serie de pruebas que cubran su rango de operación, así como la influencia que tienen sus diferentes componentes, resulta impráctico e incosteable el desarrollo de estas pruebas. Esta situación ha propiciado el desarrollo de programas de cómputo que reproducen con gran precisión el desempeño de una gran variedad de vehículos pesados. En la figura 9 se muestra un diagrama de flujo típico de uno de estos programas.

Con base en estos programas se llevó a cabo la simulación de tres vehículos típicos, de los definidos en la norma de *peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes en México* [3].

La metodología para la simulación del desempeño de estos vehículos de carga, involucró la recopilación de datos operativos de cada clase de vehículo, su tipo de llantas, frenos, suspensión, sistema de dirección, chasis y para los vehículos articulados, las características de su dispositivo de acoplamiento. De esta manera, se llevaron a cabo pruebas que permitieran evaluar las características de frenado y conducción de los vehículos, ajustándolas a resultados de pruebas experimentales reportados en la literatura. Las pruebas efectuadas, simularon el tomar una curva a velocidad y aceleración constantes, el frenado con desaceleración constante, el dar vuelta en una esquina a baja velocidad y el evitar un obstáculo enfrente del vehículo de carga, esto es, un cambio de carril a diferentes velocidades.

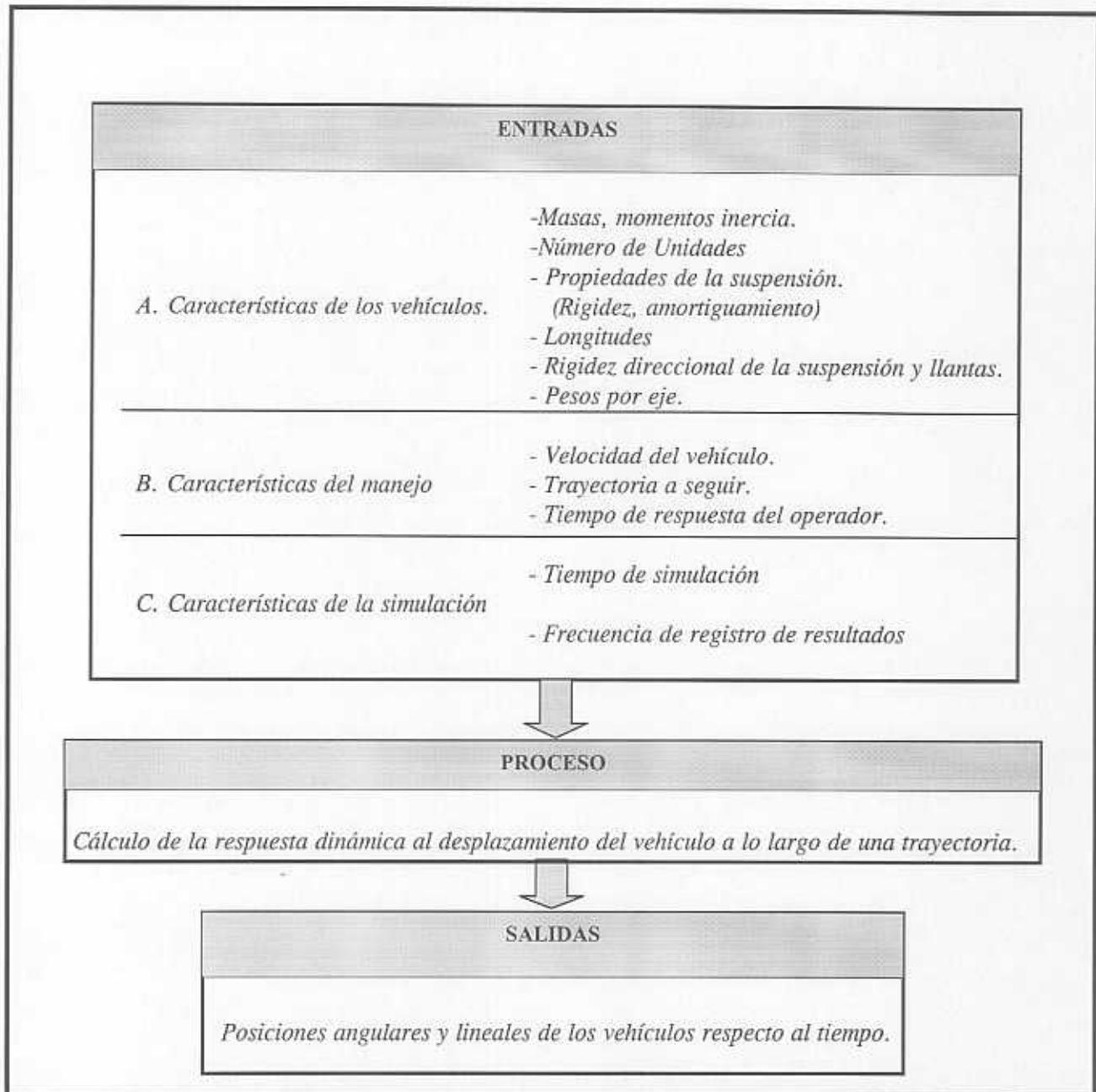


Figura 9. Diagrama de flujo de un programa típico para análisis de estabilidad.

La maniobra de dar vuelta en una esquina, se muestra en la figura 10. De esta prueba, se obtiene el *despiste* que experimentan las diferentes unidades del vehículo bajo prueba. Para la evaluación del *despiste* a alta velocidad, se supusieron curvaturas y velocidades típicas en una carretera, considerando la rigidez al giro de las llantas. Esta operación se muestra en la figura 11. Como se puede observar de las dos figuras anteriores, a baja velocidad, el *despiste* ocurre hacia el interior de la curva, sin que se presente deslizamiento de las ruedas traseras del vehículo. Sin embargo, a

alta velocidad, las llantas del eje trasero deben generar la fuerza lateral necesaria para compensar la fuerza de inercia en la caja, de tal forma que estas llantas puedan seguir la trayectoria de las del eje delantero. Esto produce un cierto deslizamiento, que provoca que el despiste se manifieste hacia el exterior de la curva.

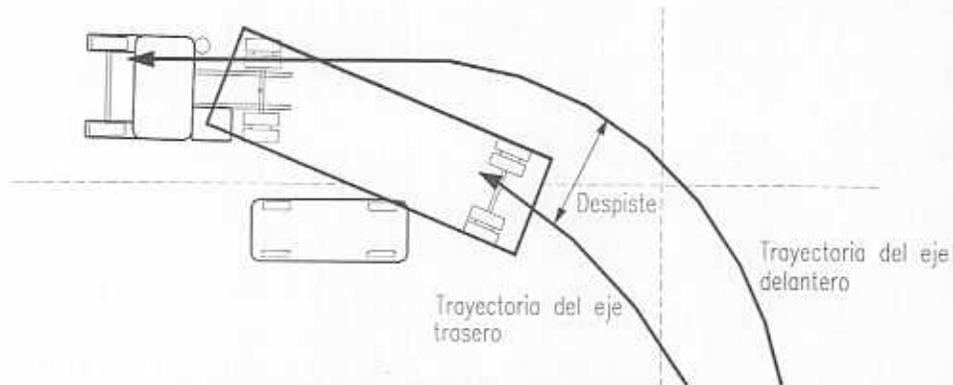


Figura 10. Despiste a baja velocidad.

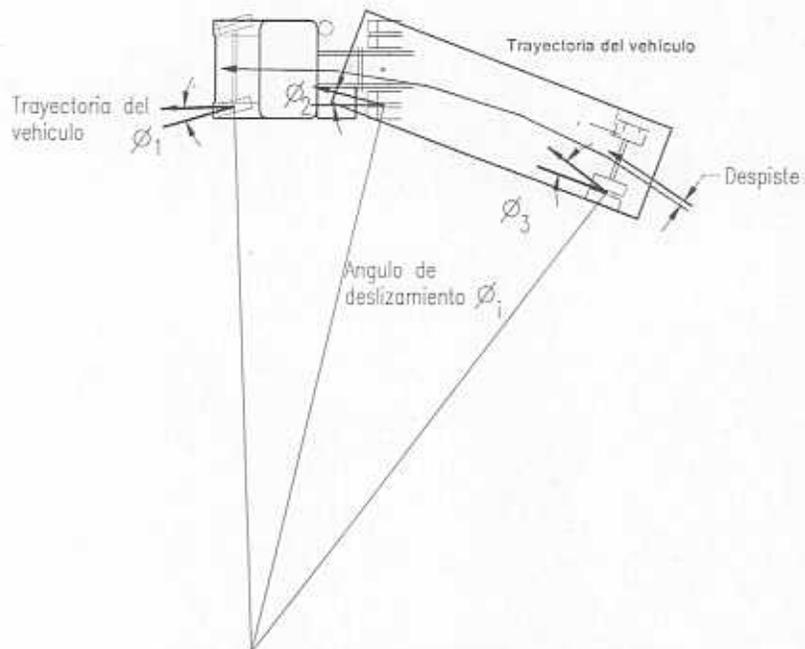


Figura 11. Despiste a alta velocidad.

La prueba de frenado con desaceleración constante, permite evaluar la eficiencia de éste, como una función del nivel de desaceleración, de tal manera que esta eficiencia está dada por el resultado de dividir el valor de la desaceleración entre el coeficiente de fricción de mayor valor que se presente en cualquiera de los ejes del vehículo. Así, para esta prueba se requiere información sobre el valor del par de frenado, como función de la presión en el cilindro maestro, que se supone proporcional a la presión ejercida en el pedal del freno, la distancia entre ejes, la ubicación de los dispositivos de acoplamiento, la altura del centro de gravedad de cada unidad y el coeficiente de transferencia de carga entre ejes duales.

De las pruebas que simulan el tomar una curva en carretera, con una aceleración constante, se obtiene el umbral de volcadura, como se muestra en la figura 12, considerando la altura del centro de gravedad, tanto de la suspensión como de la carrocería, el ancho de los ejes, rigidez y elongación de los resortes de la suspensión, la rigidez de la suspensión al giro y la vertical de las llantas. Esta prueba, se valida con datos experimentales disponibles en la literatura del tema, obtenidos de pruebas en una mesa inclinable, que para el caso de aceleración constante, permite obtener el umbral de volcadura del vehículo bajo estudio en condiciones estáticas.

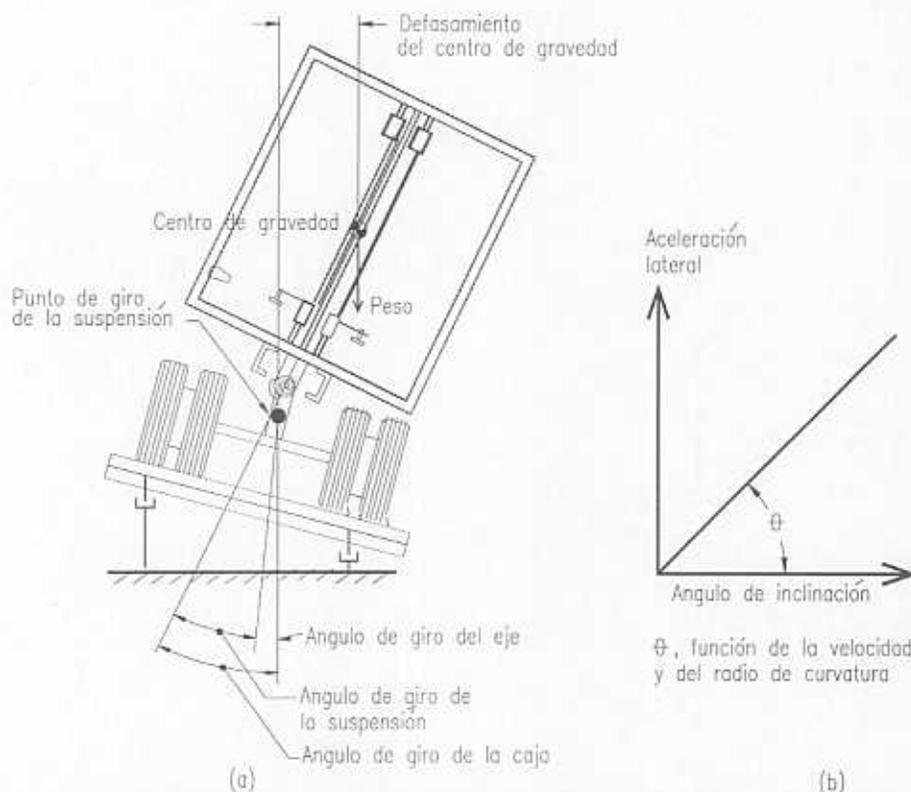


Figura 12. Arreglo experimental para la determinación del umbral de volcadura.

Una prueba que permite tener un indicativo de la *maniobrabilidad* de un vehículo de carga, consiste en obtener los ángulos de giro del volante y por ende, de las llantas que se requieren para conducir el camión por una curva de radio constante, a una velocidad fija. Según datos experimentales, la respuesta de vehículos de carga, es lineal hasta valores de aceleración lateral de aproximadamente 0.15g esto es, de alrededor de 1.5 m/s^2 , lo que se podrá observar de los resultados de las simulaciones, como se verá más adelante. Para este análisis, se consideraron las características de las llantas, de las suspensiones, las cargas verticales y las dimensiones generales del vehículo.

El análisis del comportamiento de un vehículo durante la operación de cambio de carril, como se muestra en la figura 13a, proporciona un indicativo de lo que se denomina coleo. Para fines de comparación de este efecto de coleo en los diferentes tipos de vehículos de carga, se ha definido el factor de amplificación de coleo, como el cociente del valor de la aceleración lateral de la última unidad del vehículo, entre el valor de la aceleración lateral de la primera unidad. En esta evaluación del coleo, intervienen la rapidez del movimiento del volante (*volanteo*) por parte del chofer de la unidad, la velocidad de desplazamiento del camión, la distancia entre ejes de cada unidad de la combinación vehicular analizada, la distancia del centro de gravedad de la unidad al punto de acoplamiento en su parte posterior y por supuesto, la rigidez lateral de las llantas. Como el movimiento del volante de la dirección y la aceleración lateral no son movimientos constantes, es decir, varían en su frecuencia, la evaluación del coleo también se expresa en lo que en el análisis de vibraciones se denomina el *dominio de la frecuencia*, en términos del valor de la función de transferencia entre el movimiento del centro de gravedad de la primera unidad y el movimiento del centro de gravedad de la última unidad del conjunto vehicular analizado. En la figura 13b se muestra una función de transferencia típica del coleo de un conjunto vehicular tractor-semiremolque. En vehículos de una sola unidad, el coleo se evalúa comparando la forma de onda de la aceleración lateral, con respecto a la forma de onda del movimiento del volante de la dirección. En el dominio de la frecuencia, el valor de la correlación cruzada de las dos formas de onda mencionadas anteriormente, dará una medida de su respuesta a un movimiento brusco de la dirección.

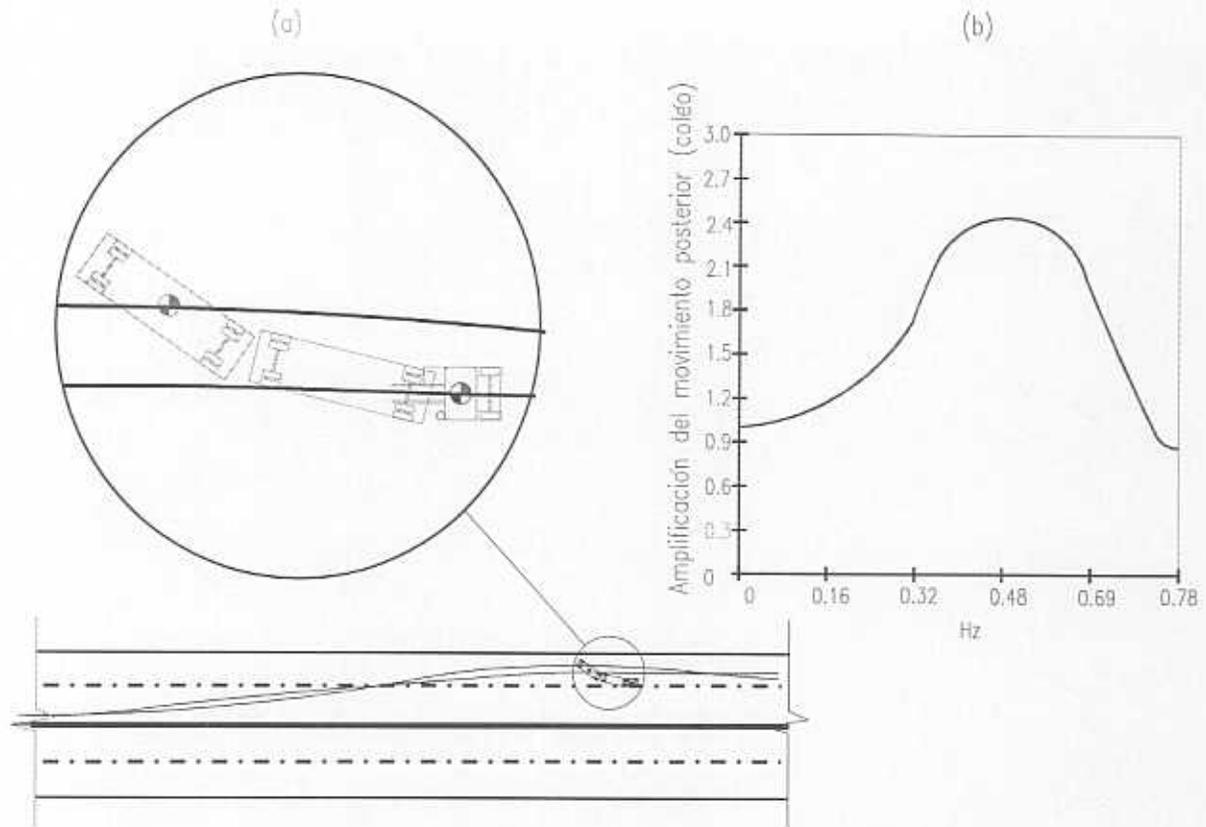


Figura 13. (a) Maniobra de cambio de carril y (b) función de transferencia típica de la aceleración lateral y el giro del volante.

4. Análisis de los vehículos y discusión de factores que afectan la seguridad

Con base en los conceptos descritos anteriormente, contenidos en los programas de computadora disponibles, se llevó a cabo el análisis de estabilidad de un camión tipo C3 (una sola unidad de 3 ejes), de una combinación vehicular tractor-semiremolque tipo T3S2 (dos unidades, una con 3 ejes y otra con 2) y de una T3S2R4 (tres unidades, una con 2 ejes, un semiremolque y un remolque con 2 ejes respectivamente). En todos los casos, para establecer patrones de comparación del desempeño de los vehículos, se simula un vehículo base y a partir de ahí, se varían los parámetros y se grafican las curvas de sensibilidad de la variable analizada, con respecto de cada uno de los parámetros seleccionados. Esta variación de parámetros se hace con el vehículo vacío y con carga a su valor nominal máximo.

Camión C3

Tomando como referencia el reglamento de pesos y dimensiones para vehículos pesados emitido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [3], el camión C3 tiene un peso bruto vehicular máximo de 26 toneladas (para un eje doble de 8 llantas), un ancho máximo de 2.6 m y una longitud máxima de 14 m. Esto se ilustra en la figura 14, donde también se indican los pesos por eje, tanto del vehículo vacío como del cargado.

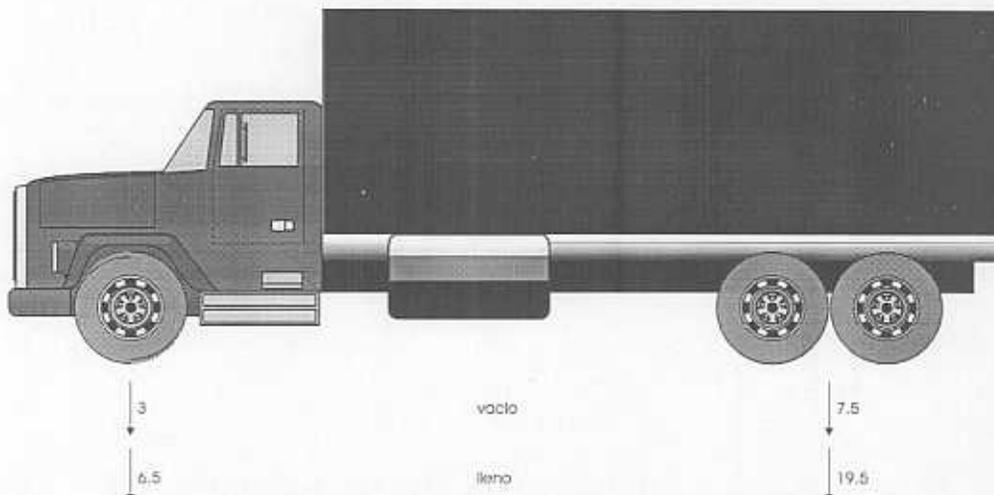


Figura 14. Pesos por eje, cargado y vacío, del camión C3 analizado.

En la tabla siguiente, se presentan las características mecánicas básicas, que se consideraron para la simulación.

Características mecánicas básicas consideradas para la simulación de un camión C3 [4].

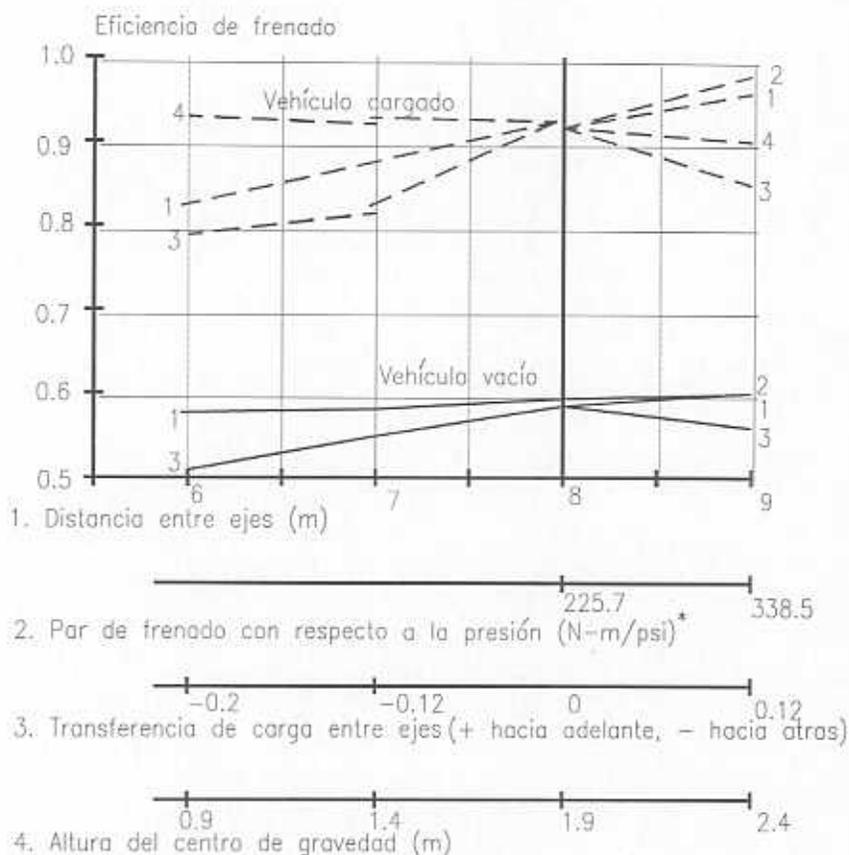
Características mecánicas	Vacío	Cargado
Peso (toneladas)	10.4	26
Par de frenado con respecto a la presión del pedal (N-m/psi*)		
Eje delantero	225.7	225.7
Eje delantero del dual trasero	338.5	338.5
Eje trasero del eje dual trasero	338.5	338.5
Transferencia de carga entre ejes	0	0
Resistencia al giro por cambio de dirección Suspensión delantera (N/grado)	450	475
Resistencia al giro por cambio de dirección eje dual (N/grado)	700	700
Disminución de la resistencia al giro de la suspensión delantera por efecto del sistema de dirección (%)	38.5	39.5
Resistencia al giro de la suspensión delantera (N-m/grado)	2,370	2,370
Resistencia al giro de la suspensión trasera (N-m/grado)	18,000	18,000
Altura del centro de rotación de la suspensión delantera (m)	0.6	0.6
Altura del centro de rotación de la suspensión trasera (m)	0.75	0.75
Altura del centro de gravedad (m)	1.15	1.9
Distancia del centro de gravedad al eje delantero (m)	3.7	6.0

*Nota. *psi*, siglas en inglés de libras sobre pulgada cuadrada. Se dejó esta medida de presión, por ser de uso común en la práctica, en vez de la correspondiente en el sistema internacional (N/m²).

De los valores de la tabla anterior, se puede apreciar la importancia de la variación de las características mecánicas del vehículo con la carga. Suponiendo, conservadoramente, una variación lineal de estas características, una sobrecarga del vehículo produce invariablemente una alteración de la capacidad de maniobra del camión, como se ilustra en las pruebas que se describen a continuación.

Frenado con desaceleración constante

En la figura 15 se muestra la variación de la eficiencia del frenado del vehículo tipo C3, con respecto a la distancia entre ejes, al par de frenado por unidad de presión en el sistema, al valor de transferencia de carga entre ejes y a la altura del centro de gravedad del camión cargado. De la figura se puede observar la diferencia en la eficiencia de frenado, que existe entre el vehículo vacío y al 100% de su carga nominal. Esta diferencia se debe a que como parámetro de diseño se selecciona la condición de carga máxima, para la optimización del sistema de frenos de los vehículos de carga. Esta situación está cambiando con la introducción de los frenos antibloqueo, que permiten mejorar la eficiencia del frenado, con el camión tanto cargado como descargado.



Nota*
 (psi, libras por pulgada cuadrada. En el sistema internacional de unidades esta relación debería expresarse en $[N-m^2]/N/m^2$, relación de unidades no común en la práctica de la ingeniería).

Figura 15. Diagrama de eficiencia de frenado para variaciones de distancia y transferencia de carga entre ejes, relación de par presión y altura del centro de gravedad.

Para elaborar esta figura, se seleccionó un punto de operación del vehículo C3 y a partir del mismo, se llevó a cabo la variación de los parámetros indicados. Cada uno de estos parámetros está referido a su propio eje coordinado, de tal manera que las curvas mostradas son independientes unas de otras, pero haciendo posible visualizar una región de operación factible. La variación paramétrica mostrada, permite establecer la sensibilidad del camión C3 a cada uno de estos parámetros, identificándose que la transferencia de carga entre los componentes del eje dual es lo que más afecta la eficiencia de frenado bajo régimen de desaceleración constante.

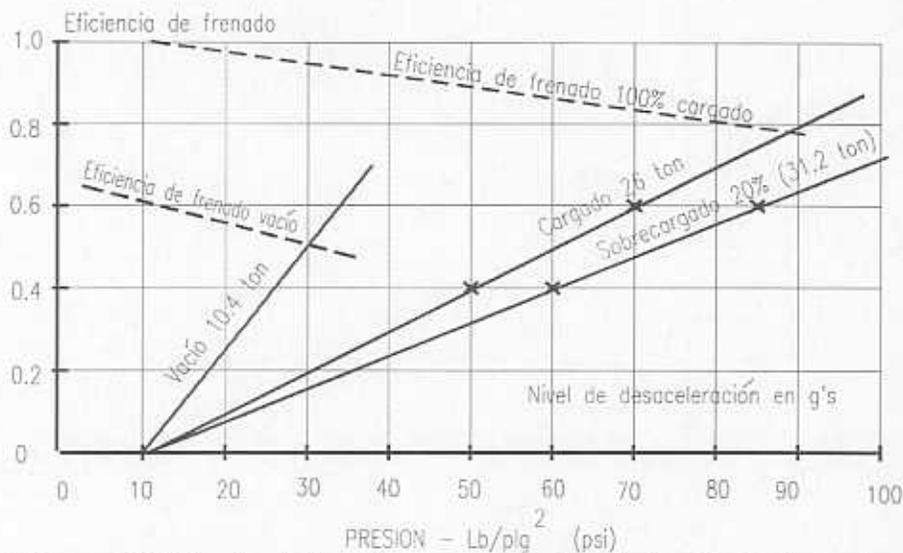


Figura 16. Efecto de la sobrecarga, en la eficiencia de frenado.

Una situación que con cierta frecuencia se presenta en este tipo de unidades, es la sobrecarga del vehículo. Para evaluar la influencia que esto tiene en la capacidad de frenado de este camión, se elaboró el diagrama mostrado en la figura 16. Las líneas continuas, indican el nivel de desaceleración constante, para los casos en que el camión está descargado y cuando tiene su carga nominal. Como ya se mencionó antes, suponiendo conservadoramente que la variación de los parámetros del vehículo con la sobrecarga es lineal, en esta figura se indicó la línea que correspondería a una sobrecarga del 20% sobre el valor máximo autorizado, esto es 31.2 toneladas. Debe notarse que las líneas de desaceleración, están ajustadas de tal manera en la gráfica que, aunque el eje vertical es la eficiencia de frenado, su valor absoluto es igual al nivel de desaceleración expresado en submúltiplos del valor de la aceleración de la gravedad (g). Con líneas punteadas se indica, para cada caso, la eficiencia del frenado. En este diagrama se indican los valores de presión requeridos para que el sistema de frenos típico de un camión C3, actúe tanto en condiciones de carga

nominal como en las de la sobrecarga supuesta. Esto para una desaceleración de 0.4g y de 0.6g. Estos valores se refirieron al diagrama de presión del sistema de frenos contra tiempo de respuesta del mismo, mostrado en la figura 7, de donde se obtuvo el tiempo de retraso, que por efecto de la sobrecarga sufre en su accionamiento el sistema de frenos, respecto a su tiempo de respuesta en condiciones normales. Para el régimen de desaceleración de 0.4g, el defasamiento es de 0.029s, mientras que para 0.6g es de 0.085s. Estos valores, aparentemente insignificantes, tienen el efecto mostrado en la figura 17. Esto es, si el camión sobrecargado viaja a las velocidades mostradas, recorrerá la distancia indicada antes de que el sistema de frenos empiece a actuar con la eficiencia esperada en condiciones normales. Por ejemplo, si el camión viaja a 80 km/h y se presenta una situación de emergencia (frenado a 0.6g), el camión viajará 2 metros antes de que se inicie el frenado. Lo anterior aunado a que el sobrepeso también modifica la transferencia de carga entre ejes duales, que como se indicó anteriormente, es el parámetro de mayor influencia negativa en la eficiencia del frenado.

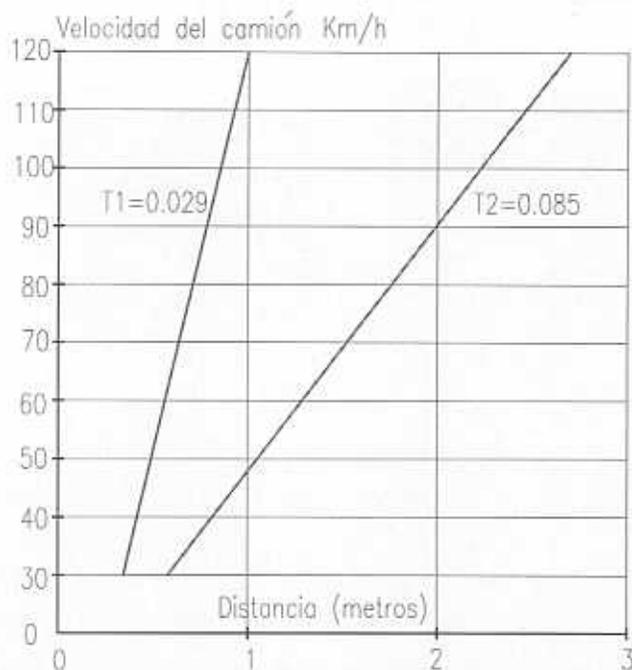


Figura 17. Tiempo adicional requerido para que actúe el freno en el camión C3 analizado. 0.029 s. para una desaceleración constante de 0.4g y 0.085 s. para una de 0.6g.

Despiste a alta y baja velocidad

El despiste normalmente se define como la desviación que tiene el centro del eje trasero, con respecto al centro del eje delantero, cuando el camión da una vuelta. Dependiendo del radio de la curva y por ende de la velocidad a la que se pueda tomar esta curva, se dice que el despiste ocurre a alta o baja velocidad. Como se muestra en la figura 18, el despiste a baja velocidad ocurre hacia el interior de la curva, mientras que el despiste a alta velocidad, se manifiesta hacia el exterior de la misma. Para cada vehículo y dependiendo de las condiciones de la curva, existe una velocidad ($V=V_0$) en la que el despiste es prácticamente cero y la trayectoria del centro del eje trasero sigue la del centro del eje delantero. La severidad del despiste, tanto a baja como a alta velocidad, depende básicamente de la longitud entre ejes, del radio de giro de la curva y, por supuesto, de la velocidad.

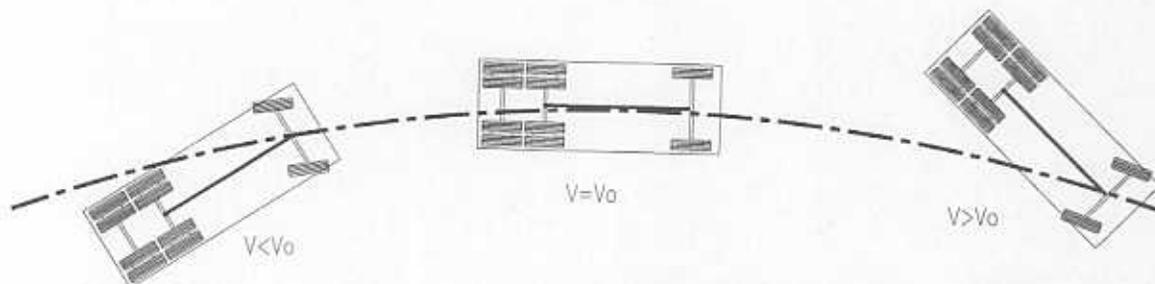


Figura 18. Comportamiento de un camión C3, en un despiste a alta y baja velocidades.

Para el caso del camión C3, en la figura 19 se muestra el valor del despiste para tres condiciones de operación. Una a baja velocidad, con un valor de despiste de 2.55 m al dar vuelta en una curva de 12 m de radio. Otra, cerca del punto de transición, donde el despiste cambia de ser hacia el interior de la curva y empieza a ser hacia el exterior. El tercer punto indica el despiste del vehículo C3, al tomar una curva de 360 m de radio a 90 km/h. En esta figura, también se indica la variación del despiste que se tendría en cada punto con el cambio de velocidad o radio de giro.

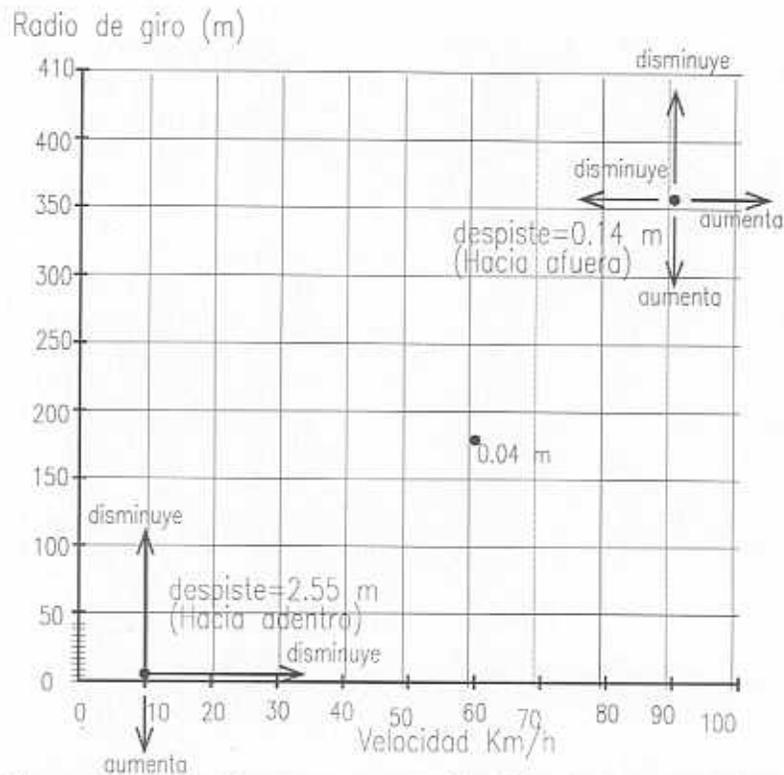


Figura 19. Valores de despiste para un camión C3, al dar una vuelta de 12 m de radio a 10 km/h y al tomar una curva de 360 m de radio a 90 km/h.

Por otro lado, en el despiste a alta velocidad, aparte de las variables mencionadas anteriormente, también se tiene una influencia determinante por parte de la rigidez de las llantas al giro (deformación lateral). En la figura 20 se muestra la influencia de la rigidez de las llantas sobre un camión C3. En ella se puede observar que la disminución de rigidez lateral de las llantas, en la condición de operación mostrada, representa 15 cm más de despiste que el que tendría la unidad en condiciones adecuadas de operación. Relacionando los resultados de la prueba anterior con los de esta sección, esto es, considerando el vehículo sobrecargado, los valores de despiste aumentan por el efecto de la carga vertical sobre la rigidez lateral de las llantas.



Figura 20. Influencia de la rigidez de la llanta al giro, en un camión C3 circulando en una curva de 360 m de radio a 90 km/h.

Tendencia a la volcadura

Los parámetros que más afectan la tendencia a la volcadura de un camión tipo C3, son la altura del centro de gravedad con el vehículo cargado, la altura del centro de rotación de la suspensión y la rigidez (resistencia) al giro de la suspensión trasera. En la figura 21 se muestra la variación paramétrica de las variables mencionadas, tomando como referencia las condiciones de operación nominales, a carga máxima permitida por el reglamento de la SCT. Para este caso, el valor de aceleración lateral (umbral de volcadura), es de 0.41 g's. Para tener una idea de lo que significa este valor de aceleración, tomemos como referencia qué valores de aceleración lateral de este orden, se presentarían en un vehículo viajando a 100 km/h en una curva de 200 m de radio. En esta figura, también se puede observar que se llega a un punto en el que aumentar la resistencia al giro de la suspensión trasera, no mejora de manera importante el umbral de volcadura. Esto, porque se llega a rigidizar tanto la suspensión, que simplemente deja de trabajar como tal. A este respecto, en algunas ocasiones se pretende aumentar la capacidad de carga de una unidad agregando elementos mecánicos que le aumenten su rigidez, pero como aquí se muestra, esto en realidad no ayuda después de un cierto punto de operación. En cambio, como se ilustra en la figura 22, el pensar que se tiene una suspensión más rígida, podría propiciar la tentación de sobrecargar el camión y de ser así, un aumento en la altura del centro de gravedad de tan solo 10 cm, reduce en un 10 % el ángulo de inclinación que puede soportar este vehículo antes de que se inicie la volcadura.

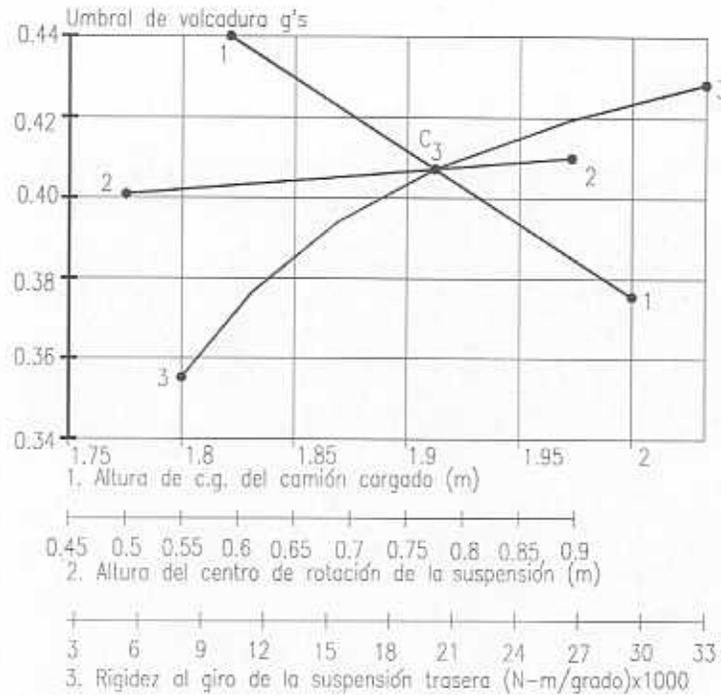


Figura 21. Influencia de la altura del centro de gravedad, del centro de rotación y de la resistencia al giro de la suspensión trasera, para un ancho del eje de 1.98 m.

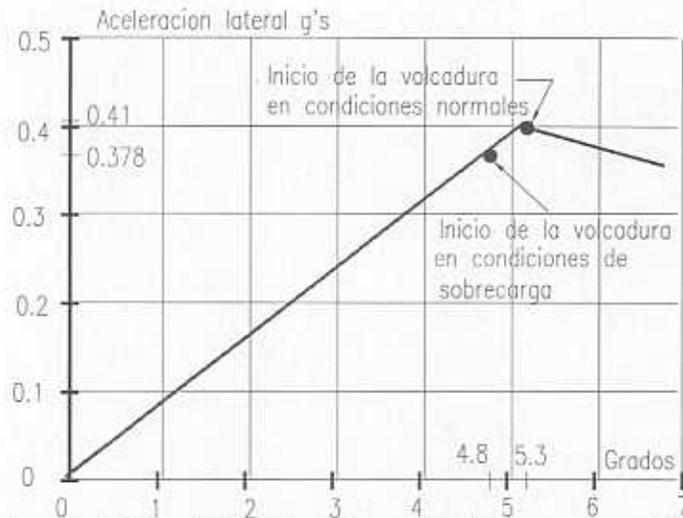


Figura 22. Variación típica del umbral de volcadura con la sobrecarga para el camión C3.

Maniobrabilidad

Para la evaluación de la maniobrabilidad del camión C3, se procedió a obtener su respuesta a un movimiento intempestivo del volante, cuando el camión se encuentra viajando a velocidad constante en un tramo de carretera recto. En la figura 23a se muestra el tiempo que se supuso toma efectuar la maniobra, para dos ángulos de giro y en la 23b, la respuesta del camión a esta excitación, como función de la carga del vehículo. Suponiendo conservadoramente, que la variación del tiempo de respuesta del sistema de dirección es lineal, se puede observar que una condición de sobrecarga incrementa el tiempo necesario para que la acción en el volante se traduzca en una reacción en la llantas. Por ejemplo, con un giro de 70° del volante, en condiciones normales de carga máxima, se tiene un tiempo de respuesta del sistema de dirección de 1.094 segundos. En condiciones de sobrecarga, el tiempo de respuesta del sistema de la dirección sería de 1.2 segundos, lo que a 80 km/h representa recorrer 2.35 m más de lo que hubiera recorrido en condiciones nominales, antes de que el vehículo responda a la maniobra.

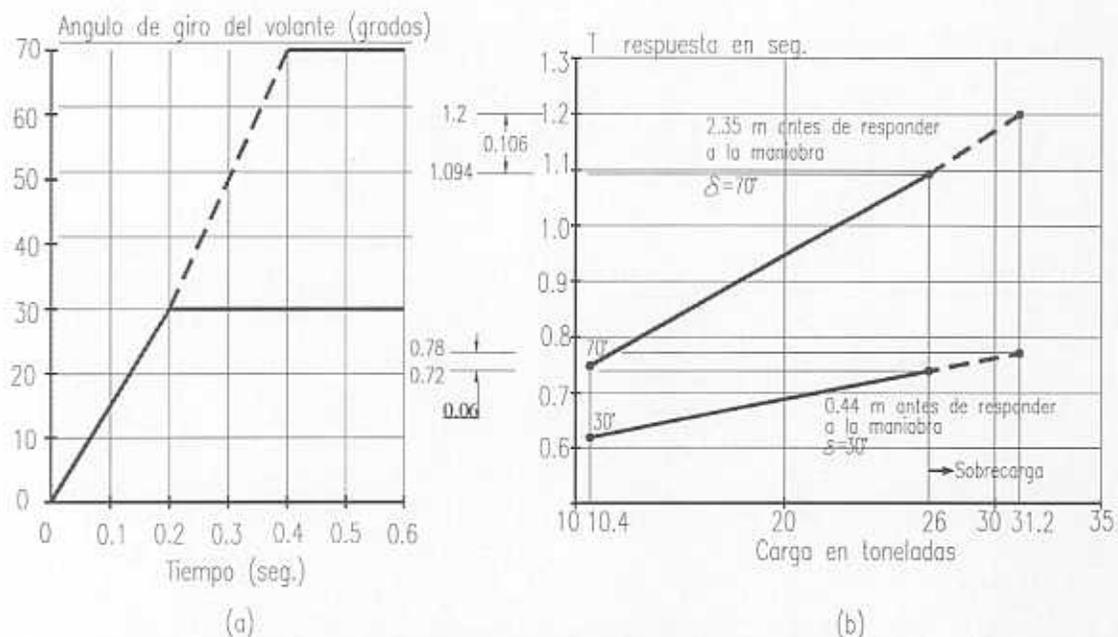


Figura 23. Tiempo de respuesta a un movimiento intempestivo del volante, para una velocidad de 80 km/h.

No obstante que se requiere efectuar un mayor número de pruebas para analizar más ampliamente el comportamiento del camión tipo C3, los resultados obtenidos hasta ahora, parecen mostrar consistentemente que una condición de sobrecarga del vehículo altera de manera importante su capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia en la carretera.

Conjuntos vehiculares tractor-semiremolque tipo T3S2 y tractor-semiremolque-remolque T3S2R4

Las características geométricas de los vehículos T3S2 y T3S2R4, según el reglamento de pesos y dimensiones, se muestran en las figuras 24 y 25 respectivamente. De estas unidades, las características mecánicas básicas consideradas para el análisis son las siguientes:

T3S2

CARACTERISTICAS MECANICAS	VACÍO	CARGADO
Tractor		
Peso (toneladas)	8.5	8.5
Par de frenado con respecto a la presión del pedal (N-m/psi*)		
Eje delantero	225.7	225.7
Eje delantero del eje dual trasero	338.5	338.5
Eje trasero del eje dual trasero	338.5	338.5
Transferencia de carga entre ejes	0	0
Resistencia al giro por cambio de dirección suspensión delantera (N/grado)	440	475
Resistencia al giro por cambio de dirección eje dual (N/grado)	820	1700
Disminución de la resistencia al giro de la suspensión delantera por efecto del sistema de dirección (%)	38.5	39.5
Resistencia al giro de la suspensión delantera (N-m/grado)	2370	2370
Resistencia al giro de la suspensión trasera (N-m/grado)	15,700	15,700
Altura del centro de rotación de la suspensión delantera (m)	0.6	0.6
Altura del centro de rotación de la suspensión trasera (m)	0.75	0.75

Características mecánicas básicas consideradas para la simulación de los conjuntos vehiculares tractor-semiremolque T3S2 y tractor-semiremolque-remolque T3S2R4.

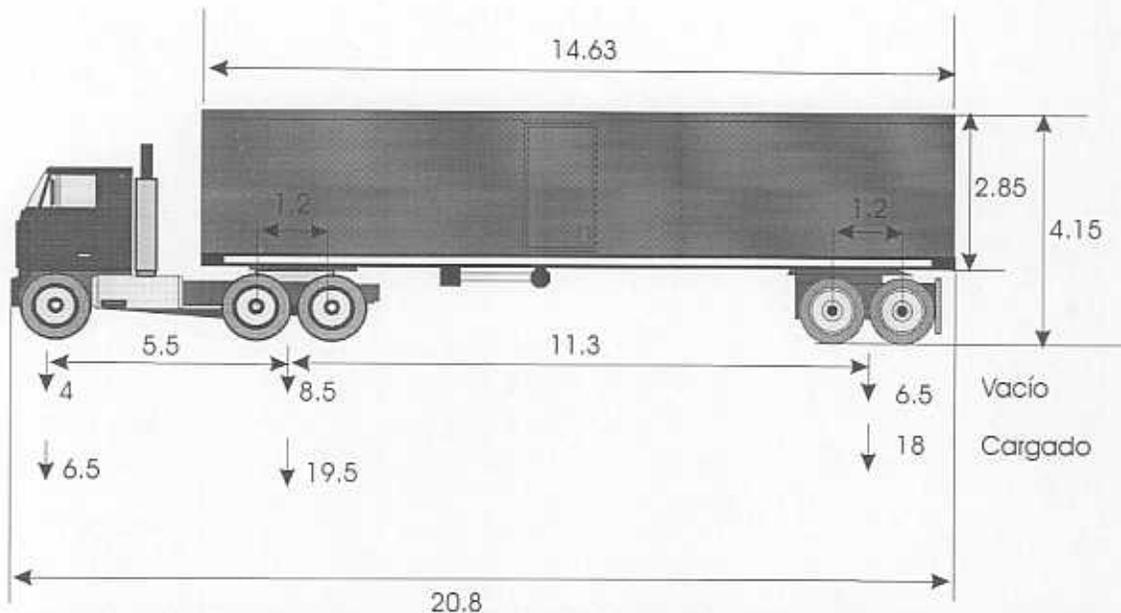


Figura 24. Conjunto vehicular T3S2. Se indican los pesos por grupo de ejes (ton.) empleados para el análisis cuando el vehículo está lleno o vacío. Longitudes en metros.

T3S2R4

Para este vehículo, se considera que los valores de par de frenado, resistencia al giro por cambio de dirección y resistencia al giro (rotación) en los eje duales, es similar a los del T3S2. La distribución de peso por unidad se consideró como sigue:

UNIDAD	VACÍO (ton)	CARGADO (ton)
Tractor	8.5	8.5
Semiremolque	10.6	29
Remolque	10	29

*Nota. psi, siglas en inglés de libras sobre pulgada cuadrada. Se dejó esta medida de presión, por ser de uso común en la práctica, en vez de la correspondiente en el sistema internacional (N/m^2).

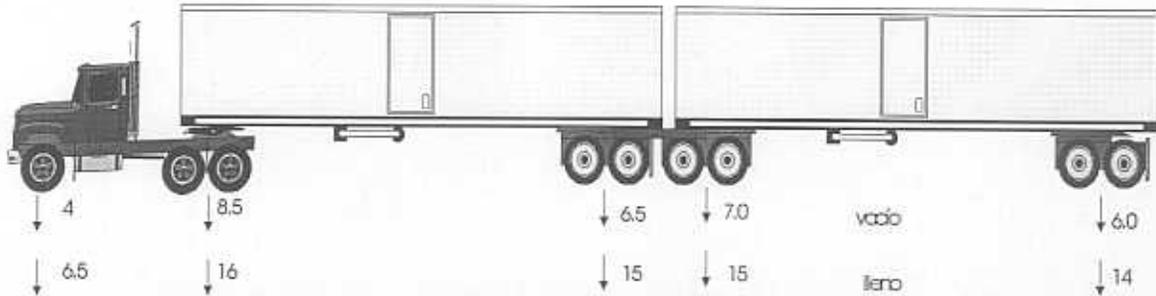


Figura 25. Conjunto vehicular T3S2R4. Las cantidades indican los pesos por eje (ton.) considerados en la simulación de esta unidad, tanto llena como vacía.

Frenado con desaceleración constante

En la figura 26 se muestra la variación de la eficiencia de frenado con respecto a la carga de las unidades. Es importante notar que esta gráfica se construyó con los cuatro puntos de operación simulados que se indican en la misma. Por esto, la variación lineal indicada es sólo una aproximación al comportamiento que tendría el sistema de frenos en puntos de operación intermedios. No obstante, de esta figura se puede apreciar la gran diferencia en el valor de la eficiencia de frenado, cuando los vehículos van vacíos o cargados. Esta situación se debe a que, desde el diseño, se favorece el tener una mejor operación de los frenos cuando el vehículo va cargado.

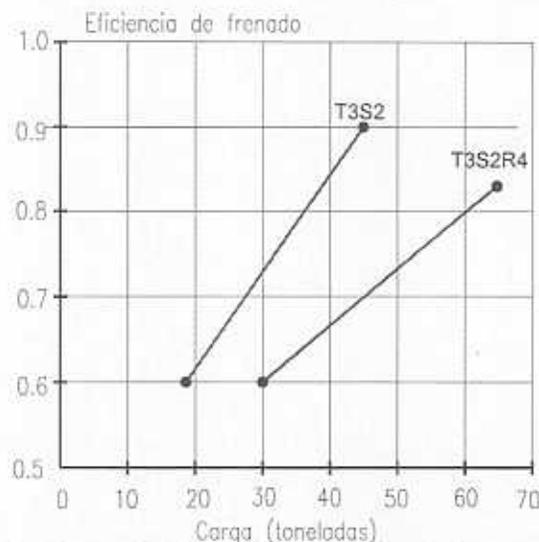


Figura 26. Eficiencia de frenado de vehículos articulados con respecto a la carga.

Refiriéndonos a la definición de eficiencia de frenado, esto es, el cociente del valor de la desaceleración entre el coeficiente de fricción de mayor valor presente durante el proceso de frenado, se tiene que el potencial de que ocurra un accidente cuando este tipo de vehículos (T3S2, T3S2R4) van

vacíos o aún a valores bajos de su carga nominal, es mayor que cuando viajan en condiciones nominales de carga. Lo anterior, ya que el frenar con una eficiencia de frenado baja, significa que el valor del coeficiente de fricción que se presenta en alguna de las llantas es muy alto, con lo que esa llanta se detendría por completo, es decir, se *amarraría*, con el consecuente deslizamiento y pérdida de estabilidad de la unidad, por coleo y/o inicio de volcadura. El otro extremo, esto es, cuando el vehículo viaja sobrecargado, también propicia una reducción de la eficiencia de frenado como se ilustra en la figura 27. Aquí se representa la variación de la altura del centro de gravedad, con los vehículos cargados a las capacidades máximas autorizadas y con una sobrecarga del 20%. Esta sobrecarga se simuló al considerar que la densidad de carga (kg/m^3) se mantiene constante, con lo que la única opción para la sobrecarga, es una elevación en la altura del centro de gravedad de los compartimientos de carga. De esta manera se puede apreciar el efecto que esta elevación del centro de gravedad tiene ante dos valores de desaceleración constante. A un régimen de desaceleración de 0.1g, esto es una operación de frenado, podríamos llamar cómodo, la reducción de la eficiencia de frenado por efecto de la elevación del centro de gravedad de las unidades, es del orden del 2 %; en caso de una frenada de emergencia, por ejemplo, a 0.4g's aparte de por sí tener una eficiencia de frenado menor, se tiene una reducción de alrededor del 5 % adicional por efecto de la sobrecarga. De las pruebas efectuadas en los tipos de vehículos analizados, se observó que los parámetros que más afectan el desempeño de los frenos, son la distribución del par de frenado en las diferentes llantas, es decir, el valor del par y el tiempo en el que va a actuar en cada llanta y la distribución de la carga por eje. El primero de estos parámetros, depende del diseño y del mantenimiento de los vehículos, mientras que el segundo corresponde a las prácticas operativas del transportista. Sin embargo, en ambos casos, el conocimiento detallado de estos aspectos, se estima, podría incidir en el índice de accidentes carreteros que involucren vehículos pesados.

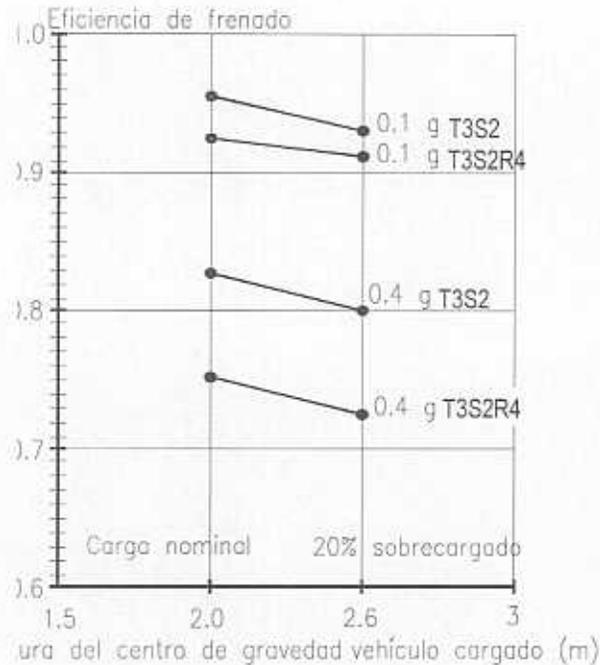


Figura 27. Efecto sobre la eficiencia de frenado, de elevar el centro de gravedad en los vehículos articulados T3S2 y T3S2R4 para dos valores de desaceleración constante.

Despiste a alta y baja velocidad

El parámetro más importante que afecta el despiste a alta velocidad en los vehículos articulados, es la rigidez del eje del extremo posterior de la unidad. Así, en la figura 28 se muestra la variación del despiste a alta velocidad, con respecto a la resistencia al giro del eje dual más alejado de la unidad tractiva, para las combinaciones vehiculares T3S2 y T3S2R4, a diferentes velocidades y radios de curvatura. De esta figura, se puede observar el cambio de dirección del despiste para la unidad T3S2 como función de la rigidez de las llantas del eje dual trasero. Esto significa, que dependiendo del tipo y estado de las llantas, el despiste de este vehículo, viajando en una curva de 180 m de radio, a 60 km/h, puede pasar de alrededor de 10 cm hacia el interior de la curva, a alrededor de 20 cm hacia el exterior de la misma. En el conjunto vehicular tractor-semiremolque-remolque simulado, viajando en las condiciones indicadas, esto es, en una curva de 255 m de radio a 90 km/h, se obtienen variaciones de hasta 20 cm en el despiste. Ciertamente, no estaría de más, para reducir el riesgo de un accidente, evitar el rebasar en curva vehículos de esta naturaleza, aun en autopistas de altas especificaciones.

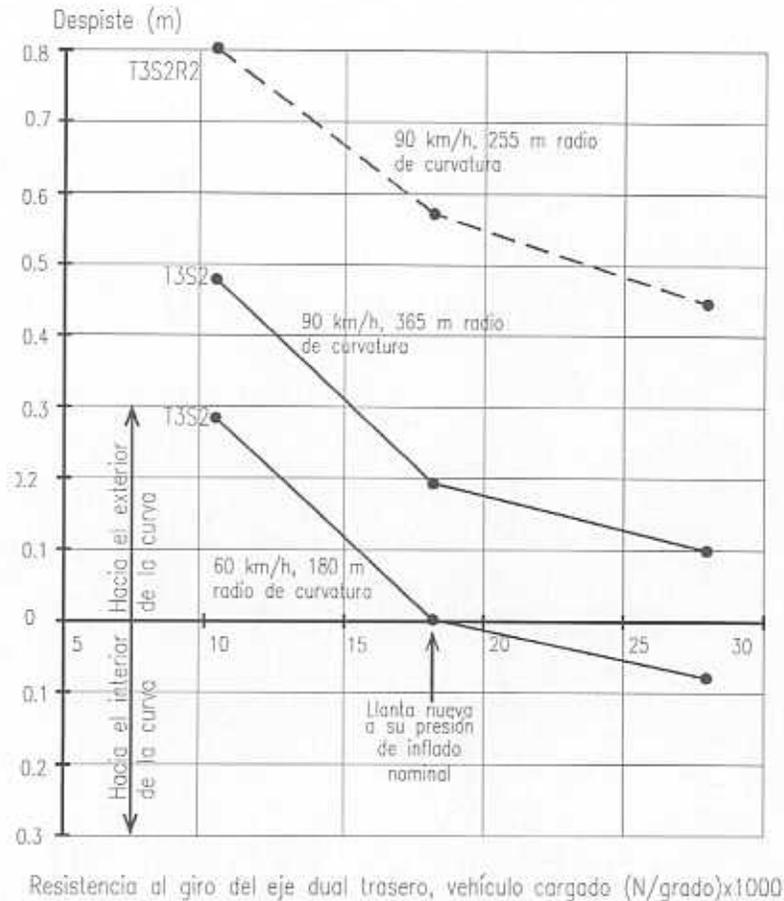


Figura 28. Despiste a alta velocidad de los vehículos articulados T3S2 y T3S2R4 para las condiciones indicadas de curvatura de la carretera y rigidez del eje dual trasero.

Por lo que respecta al despiste de vehículos articulados a baja velocidad, en la figura 29 se muestra la variación del despiste de una unidad T3S2, considerando una distancia entre ejes del tractor, de 5.5 m. En la figura se indica el despiste que tendría este vehículo con un semiremolque con una distancia entre ejes de 11.3 m, que típicamente correspondería a un semiremolque con una longitud total de 14.6 m y el despiste que tendría si, con el mismo tractor, se jalara un semiremolque con una longitud total de 16.15 m (53 pies) y una distancia entre ejes de 14.5 m. La magnitud del despiste a baja velocidad, de este tipo de unidades, depende básicamente de la longitud relativa de los componentes del conjunto vehicular, del tipo de acoplamiento y del coeficiente de fricción entre las llantas y el pavimento, de tal manera que aún cumpliéndose con el reglamento de pesos y dimensiones, pueden tenerse valores de despiste diferentes. Por ejemplo, en un vehículo T3S2R4 se obtienen valores de despiste a baja velocidad que van desde 5 a 11 metros, manteniendo una longitud total constante,

dependiendo del tipo de acoplamiento y longitud relativa entre las unidades. Se estima que esta situación podría ser relevante, en la especificación de cruceros y patios de maniobras en instalaciones portuarias e industriales.

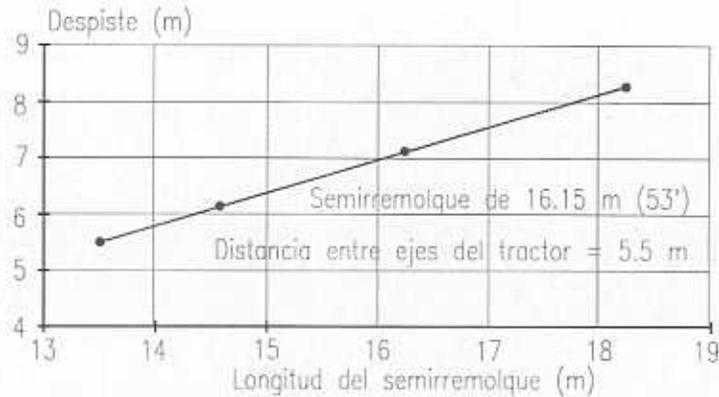


Figura 29. Despiste a baja velocidad de un vehículo tipo T3S2

Tendencia a la volcadura

En la figura 30 se muestra la variación del umbral de volcadura para las dos unidades articuladas bajo análisis, con respecto a la resistencia al giro de la suspensión. En el caso mostrado, se tomó como parámetro la rigidez del eje dual de la suspensión trasera del semiremolque en el caso del vehículo T3S2 y la de la parte posterior del remolque en el caso del T3S2R4. En esta figura también se indican los valores típicos de rigidez para una suspensión tipo viga basculante y para las suspensiones de aire. De aquí, se puede apreciar que una reducción de las condiciones nominales de operación de una suspensión, ya sea por desgaste y/o falta de mantenimiento, modifica apreciablemente su capacidad de evitar una volcadura en condiciones de emergencia. Esta misma situación se aprecia en la figura 31, donde se ilustra el cambio en el umbral de volcadura de los vehículos estudiados, para una variación de la altura de su centro de gravedad. Como ejemplo de la importancia que esta variación tiene en el comportamiento del vehículo, consideremos estas unidades viajando en una curva sin peralte de 240 metros de radio. El elevar el centro de gravedad del semiremolque en el caso del T3S2 y del remolque en el caso del T3S2R4, de 1.9 m a 2.6 m, equivaldría a que las condiciones de volcadura, se presentaran a los 89 km/h, en vez de a los 112 km/h, en el caso del T3S2 y a los 96 km/h, en vez de a los 117 km/h, en el caso del T3S2R4, como se ilustra en la figura 31b.

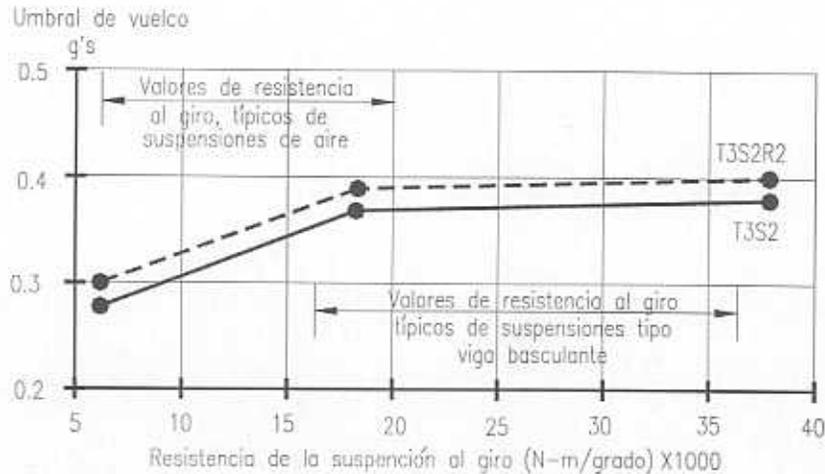


Figura 30. Variación del umbral de volcadura para los vehículos T3S2 y T3S2R4 en función de la resistencia de la suspensión al giro.

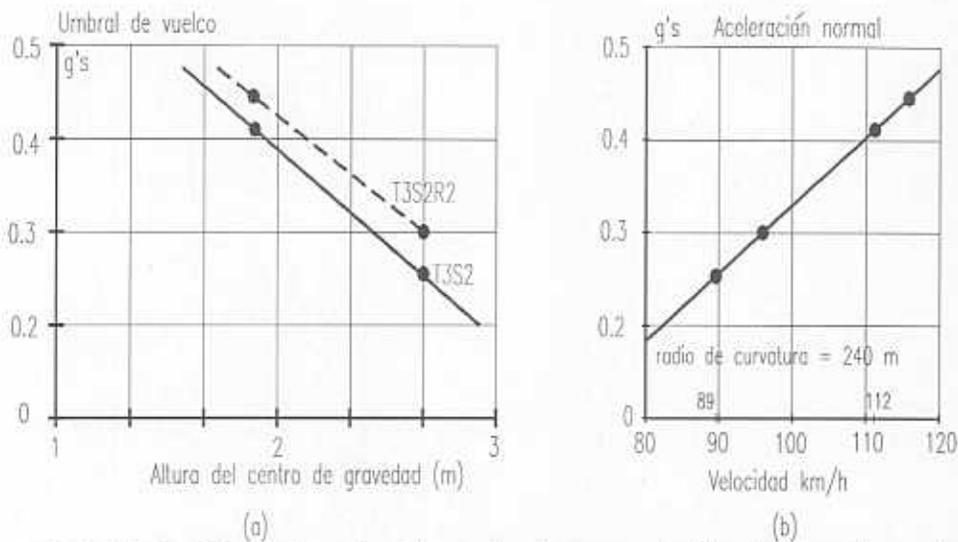


Figura 31. Variación del umbral de volcadura con (a) la altura del centro de gravedad y su relación (b) con la velocidad de viaje en una curva de 240 m de radio, para los vehículos T3S2 y T3S2R4 .

Maniobrabilidad

Finalmente, la maniobrabilidad de los vehículos articulados y su relación con situaciones de accidente en las carreteras, se ilustra en la figura 32. Aquí se puede observar el efecto que tiene una maniobra de giro del volante de la dirección de una unidad tipo T3S2 en la estabilidad del tractor-semiremolque, cuando va cargado a su valor nominal, según el reglamento y cuando lleva una sobrecarga del 25 %. En esta figura, están indicadas las

trayectorias del centro de gravedad del tractor (línea punteada) y del semiremolque (línea continua) para diferentes giros de la dirección. Estos giros van de 2 hasta 12 grados, con el vehículo viajando a 90 km/h. Con el valor de las escalas en cada uno de los ejes, se buscó amplificar el desplazamiento lateral, para resaltar la desviación de las trayectorias del tractor y del semiremolque. Así, para condiciones normales de carga, aún con un giro del volante de 12 grados, se mantiene congruencia entre la trayectoria del tractor y el semiremolque, esto es, mantienen estable su movimiento. Sin embargo, con una sobrecarga del 25 %, la maniobra de girar la dirección 12 grados, ya habría ocasionado la inestabilidad del conjunto vehicular y posiblemente un aparatoso accidente.

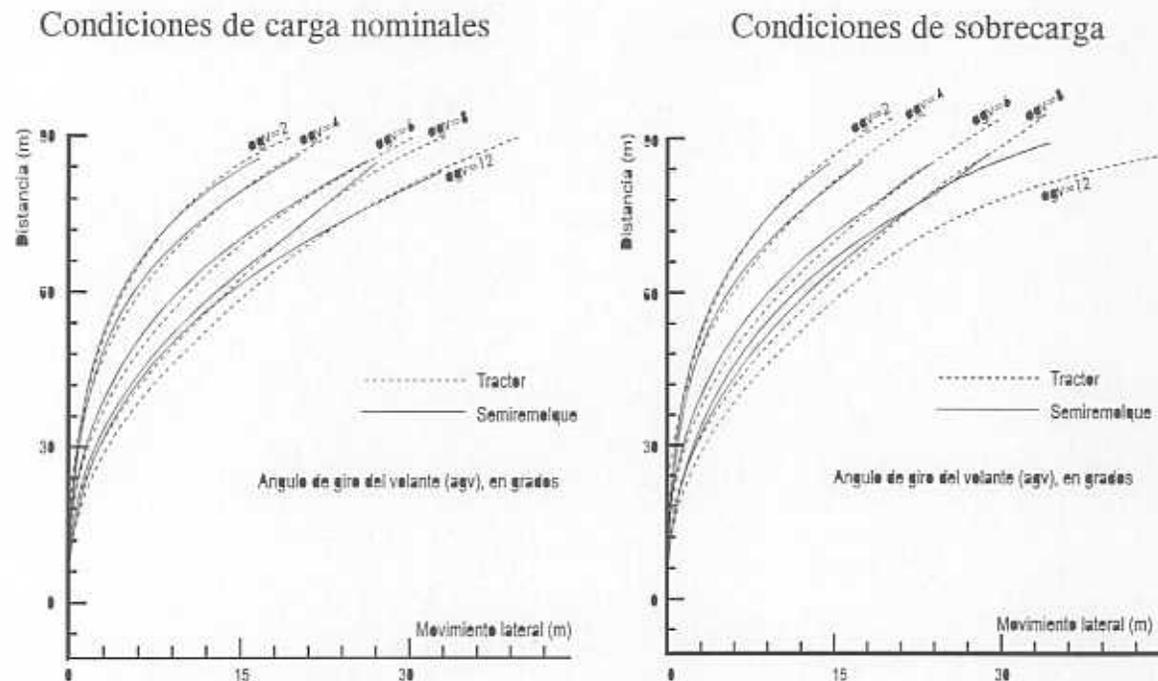


Figura 32. Efecto de un 25% de sobrepeso en una maniobra de un vehículo T3S2.

5. Conclusiones

Con los datos presentados anteriormente, se deja establecida la posibilidad de cuantificar el impacto, que la mala operación y/o un mantenimiento deficiente de los vehículos de carga, tiene en los accidentes carreteros que involucran este tipo de unidades. Asimismo, se plantea la posibilidad de identificar las causas que producen los accidentes, ampliando las posibilidades de prevenirlos. Con estos elementos, también se establece una capacidad de análisis de nuevas configuraciones vehiculares y del impacto que puedan tener en la seguridad en las carreteras. Esto último de especial importancia en nuestro país, pues vehículos que operan con márgenes de seguridad adecuados en cierto tipo de carreteras, no necesariamente lo harán con esos mismos márgenes en la red carretera de México.

Considerando la importancia social (pues es imperativo proteger a los usuarios de las carreteras nacionales) y económica (el transporte de productos no es un servicio social, es un negocio) que tiene el minimizar el número de accidentes en carreteras, en este caso los que involucren vehículos pesados, se requiere establecer un vínculo que permita analizar objetivamente el margen de seguridad en la operación de vehículos de carga (cada vez más grandes y potentes) sin menoscabo de su rentabilidad. En este caso, un vínculo muy importante es, precisamente, el análisis de la estabilidad de los camiones de carga. Para esto debe ayudar, en gran medida, también contar con estadísticas de accidentes más detalladas y confiables, que junto con el análisis del accidente, permitan prevenirlos en vez de analizarlos.

Referencias

1. North American Transportation. Bureau of Transportation Statistics, U.S. Department of Transportation. Mayo de 1994.
2. Centre for National Truck Statistics, The University of Michigan, Transportation Research Institute, *Truck and Bus Accident Factbook 1992*. UMTRI 94-44, 1994.
3. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, *Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-12-SCT-2-1995 sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*, Diario Oficial del 4 de septiembre de 1995.
4. The University of Michigan, Transportation Research Institute, *Computer simulation of heavy vehicle dynamic behaviour. User's guide*, 1985.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues-Galindo
76700 P. Escobedo, Qro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71
Internet <http://www.imt.mx>