



ISSN 0188-7297



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

---

# **REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE VEHÍCULOS PESADOS**

**David Vázquez Vega**  
**Manuel de Jesús Fabela Gallegos**  
**Miguel Martínez Madrid**

**Publicación Técnica No. 259**  
**Sanfandila, Qro. 2004**

---

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

**Revisión documental sobre la  
evaluación del comportamiento  
dinámico de vehículos pesados**

**Publicación Técnica No. 259  
Sanfandila, Qro. 2004**

---

## **Créditos y agradecimientos**

---

Este documento fue elaborado por el M. C. David Vázquez Vega, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos y el Dr. Miguel Martínez Madrid, investigadores y coordinador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se agradecen los comentarios y sugerencias del M. C. José Ricardo Hernández Jiménez, investigador de la misma Coordinación.

---

# Índice

---

	Página
<b>Resumen</b> .....	V
<b>Abstract</b> .....	VII
<b>Resumen ejecutivo</b> .....	IX
<b>Introducción</b> .....	1
<b>1 Antecedentes en la evaluación de vehículos</b> .....	5
1.1 Desarrollo de la necesidad de evaluación .....	5
1.2 Eficiencia operacional del transporte de carga .....	7
<b>2 Investigación en la dinámica de vehículos</b> .....	11
2.1 Pesos y dimensiones .....	11
2.2 Desempeño de los vehículos .....	12
<b>3 Generalidades de las medidas de desempeño</b> .....	21
3.1 Respuesta direccional y estabilidad .....	21
3.1.1 Estabilidad direccional .....	21
3.1.2 Balanceo y volcadura .....	22
3.1.3 Estabilidad direccional .....	21
3.2 Manejabilidad de un vehículo .....	23
3.3 Medidas de desempeño .....	25
3.3.1 Desempeño de manejabilidad .....	26
3.3.1 Umbral estático de volcadura .....	27
3.3.1 Estabilidad dinámica a la volcadura .....	28
3.3.1 Razón de amortiguamiento al coleo .....	29
3.3.1 Demanda de fricción .....	29
3.3.1 Utilización de fricción lateral .....	30
3.3.1 Despiste .....	30
3.3.1 Desempeño al frenado .....	30
<b>Conclusiones</b> .....	33
<b>Referencias</b> .....	35



# Resumen

---

Se presenta brevemente la evolución que se ha dado en torno a los esquemas de análisis empleados para la evaluación de vehículos, particularmente los de carga pesada. Así mismo, se describen algunos aspectos que han colocado las necesidades de evaluación del desempeño de los vehículos en un mayor nivel de interés, especialmente desde la perspectiva regulatoria y de seguridad en tránsito. A la vez, se hace énfasis en el desarrollo de la definición de parámetros específicos de desempeño, orientados específicamente al comportamiento dinámico de vehículos pesados. Finalmente, extraídos del desarrollo de los parámetros de evaluación, se describen las generalidades de algunas medidas de desempeño, necesarias para una detallada caracterización del comportamiento dinámico de los vehículos.





## **Abstract**

---

Evolution in the analysis of vehicle evaluation scenarios is briefly described in this document, especially in heavy duty and commercial vehicles. As far as heavy vehicle weighs and dimensions deregulatory politics has been applied in some countries, it has been necessary to address research towards aspects as pavement damage and vehicular safety. The development on the specific parameter definitions to evaluate vehicle performance has lead to vehicle dynamics investigations to improve safety criteria; the above is also mentioned in this document. Finally, overall characteristics of some performance measures applied in the evaluation of dynamic behavior of heavy vehicles are described.



## Resumen ejecutivo

---

Debido a la necesidad de movimiento de alimentos, insumos y mercancías a través del territorio y las fronteras de un país, el transporte de carga ha sido uno de los principales detonantes e indicadores del progreso y desarrollo económico. Los vehículos de autotransporte presentan, además, la flexibilidad para ser configurados de acuerdo a las necesidades de evolución del mercado.

Por su parte, las políticas de desregulación de pesos y dimensiones emprendidas para incrementar eficiencias operativas y productividad del autotransporte de carga, ha propiciado que haya vehículos de mayores dimensiones y niveles de carga que circulen por la red carretera. Consecuentemente, se han afectado otros aspectos del transporte, como la seguridad y el riesgo de mayores daños a la infraestructura. En este sentido, debe considerarse la compatibilidad entre vehículos e infraestructura carretera, de manera que con el uso combinado se mantengan bajo control los niveles de deterioro de carreteras y puentes. Respecto a la seguridad vehicular, la relación es más crítica entre la configuración del vehículo, las condiciones de operación y el entorno.

Para identificar la compatibilidad de uso de los vehículos pesados con entornos específicos, se requiere evaluar las características de pesos y dimensiones de las distintas configuraciones vehiculares, así como de su desempeño dinámico, lo cual incide en la seguridad al circular bajo condiciones normales o adversas. La evaluación del comportamiento dinámico se basa en la determinación de los niveles de estabilidad y capacidades de control, principalmente ante condiciones de manejo extremas, tales como virajes inesperados o frenadas bruscas.

En este sentido, investigaciones alrededor del mundo en el área de dinámica vehicular, han planteado, discutido y establecido algunas metodologías y procedimientos tanto de evaluación como de análisis del comportamiento. A partir de esos trabajos se han diseñado ciertos indicadores, llamados medidas o parámetros de desempeño, para evaluar con mayor objetividad el desempeño de los vehículos pesados. Estas medidas proporcionan información relevante sobre los posibles niveles de seguridad de un vehículo al circular por carretera, lo que permite acotar su comportamiento de acuerdo a las condiciones y escenarios de operación.

En este escrito se presenta brevemente la evolución que se ha dado en torno a los esquemas de análisis empleados para la evaluación de los vehículos, particularmente los de carga pesada. También se describen las generalidades de algunas medidas de desempeño, entre las que resaltan la manejabilidad, el umbral de volcadura, la estabilidad dinámica y el desempeño al frenado, que pueden ser aplicadas tanto a vehículos unitarios como a combinaciones multiarticuladas.

---

# Introducción

---

Uno de los principales detonantes e indicadores del progreso y desarrollo económico de cualquier país es el relacionado con el autotransporte de carga. Esto se debe, desde luego, a que a través de la red carretera los alimentos, insumos y mercancías esenciales, tanto para el desarrollo económico y social doméstico como el de exportación, son transportados por los diversos tipos de vehículos de carga. Muchos de estos vehículos pueden además ser configurados de manera flexible, respondiendo de esta manera a las necesidades de evolución del mercado.

La desregulación de pesos y dimensiones, como política emprendida por algunos países para incrementar la eficiencia operativa y la productividad del autotransporte de carga, ha dado lugar a una serie de acciones de adaptación y modificación de los vehículos. Lo anterior condujo a que haya vehículos de mayores dimensiones y niveles de carga que circulen por la red carretera. De esta manera, los transportistas intentan obtener un mejor aprovechamiento económico en términos de los virtuales ahorros que se derivan del transporte de mayores volúmenes de carga y de su diversificación. Por ejemplo, unidades articuladas de carga que fueron diseñados como plataformas con redilas para el transporte de productos a granel, se han visto convertidos en semirremolques para el transporte de contenedores, removiendo parcial o totalmente dichas redilas. Lo mismo se puede observar en camiones unitarios de redilas del tipo C3. Sin embargo, como consecuencia de este tipo de acciones se han afectado otros aspectos del transporte, como es la seguridad y el riesgo de mayores daños a la infraestructura carretera. Como muestra sencilla se puede citar el incremento del riesgo en el transporte debida a las condiciones de sujeción o contención adecuada de la carga, derivado de los ejemplos anteriores.

Adicionalmente, los vehículos de carga pesada tienen no sólo un impacto significativo sobre el nivel de deterioro de la infraestructura carretera, sino también en la seguridad del resto de los usuarios de la misma. En este sentido, debe considerarse la compatibilidad que tengan vehículos e infraestructura para transitar por carretera. Esta observación parte del propósito de mantener bajo control los niveles de deterioro de carreteras y puentes y, con ello, tener mayor precisión en los ajustes de los programas de conservación, al menos durante su periodo proyectado de vida útil.

El daño provocado a la infraestructura carretera por parte de vehículos pesados depende, entre otros aspectos, del peso bruto vehicular, de la carga soportada por cada conjunto de ejes (ya sea en arreglo de eje simple, de tándem o de tridem), así como de la distribución de estos ejes en la configuración vehicular. Entre los parámetros más finos que tienen un efecto directo en el deterioro del pavimento, se cuenta la magnitud de la presión de inflado de los neumáticos y el tipo de suspensión, así como características de la zona de contacto entre llanta y pavimento. A partir de esta interacción se puede estimar la forma y magnitud en

que el vehículo pesado incide sobre los diferentes elementos de los pavimentos y la infraestructura carretera, resultando, en la mayoría de los casos, situaciones especialmente críticas en puentes. Algunos de los métodos de estimación del nivel de deterioro producido por vehículos de carga, evalúan y cuantifican el daño con el propósito de proyectar las actividades de conservación y prevención de las redes carreteras. Respecto a puentes, se han desarrollado (y continúan desarrollándose) investigaciones sobre los mecanismos de daño producidos por los vehículos pesados y su evaluación, involucrando cada vez más las características inherentes al movimiento de los vehículos.

Con respecto a la seguridad en carreteras, la relación es más estrecha con la configuración del vehículo y las condiciones y características de operación por parte del conductor, aunque se mantiene la dependencia con las condiciones del entorno. La configuración, en particular la de un vehículo pesado, presentará un determinado comportamiento dependiendo de las condiciones operativas y del entorno, que pueden representar reducciones en la seguridad del tránsito y de otros usuarios de la red carretera. Los hábitos de manejo, las prácticas de distribución y de sujeción de la carga y el estado fisiológico del operador, entre otros, inciden de manera significativa en la respuesta dinámica del vehículo y, por ende, en su seguridad. Si además, el entorno presenta condiciones físicas y climatológicas adversas, la respuesta puede modificarse y desencadenar sucesos completamente inesperados.

Uno de los objetivos de evaluar las configuraciones de vehículos pesados, es el de identificar la compatibilidad de empleo de cada configuración con la infraestructura carretera. En un proceso de evaluación estática pueden intervenir parámetros como dimensiones, pesos, distribución de la carga, trazo geométrico de carreteras, capacidad de soporte de carga y condición de la superficie de rodamiento, principalmente. Sin embargo, un análisis de mayor complejidad, pero con mejor aproximación a la realidad, corresponde a una evaluación que involucre el desempeño dinámico del vehículo y sus interacciones con el conductor, la carga y el entorno. Puesto que los vehículos requieren de ciertas capacidades para desplazarse y para modificar su movimiento, se debe tener en cuenta que tales capacidades están íntimamente ligadas a su comportamiento dinámico. Por tanto, el comportamiento incide en su seguridad, ya sea que transite en entornos bajo condiciones normales o adversas.

Así pues, dicha evaluación del comportamiento se apoya prácticamente en la determinación de los niveles de estabilidad y capacidades de control, principalmente ante condiciones de manejo extremas, tales como virajes inesperados o frenadas bruscas. En este sentido, en las investigaciones de la dinámica vehicular se han planteado, discutido y establecido algunas metodologías y procedimientos, tanto de evaluación como de análisis del comportamiento. Como parte de los resultados obtenidos en tales investigaciones, se han definido algunos parámetros que permiten cuantificar y comparar el desempeño o comportamiento (estático o dinámico) de los vehículos y sus diversas configuraciones vehiculares.

Los esquemas de conservación de la infraestructura carretera, así como las condiciones del tránsito en las mismas, se alteran de manera significativa debido a la circulación de los vehículos pesados. Por tanto, se debiera ponderar el compromiso que existe entre el desempeño mecánico de los vehículos pesados y su desempeño productivo. La evolución que han experimentado vehículos y carreteras ha reforzado la necesidad de atacar aspectos que anteriormente jugaban un papel secundario. Uno de ellos es la seguridad en tránsito, que a la vez ha dado lugar al surgimiento de áreas de estudio específicas, como es el caso de la dinámica de vehículos pesados.

A grandes rasgos, en este escrito se describe la evolución en torno a los esquemas de análisis empleados para la evaluación de vehículos. Se enfatiza el desarrollo que se ha dado en la definición de parámetros específicos de desempeño, diferenciando los criterios de aplicación de acuerdo a la configuración vehicular, orientados especialmente al comportamiento dinámico de los vehículos pesados.





# **1 Antecedentes en la evaluación de vehículos**

## **1.1 Desarrollo de la necesidad de evaluación**

La preocupación por mantener la seguridad vehicular y de carreteras ha sido motivo para dar impulso al desarrollo de múltiples aspectos de la infraestructura carretera, del equipo en los sistemas de transporte y de la logística de distribución. Esta seguridad debe interpretarse como el conjunto de condiciones para crear un ambiente de operación y uso con el mínimo de riesgos durante el tránsito de vehículos.

La historia de la civilización muestra que el desarrollo del sector transporte se basa en un compromiso permanente entre los constructores de caminos y los operadores de vehículos que los usan, [1]. La necesidad de los transportistas de mover mayores volúmenes de carga es compensada con la necesidad de protección de la infraestructura carretera, principal preocupación de las entidades responsables del mantenimiento. Alrededor de este compromiso se han estructurado leyes y reglamentos para controlar las características del tránsito por carretera, cuyo propósito fundamental es mantener las vías con el mínimo de deterioro físico posible.

En la actualidad, se han desarrollado e implementado métodos que permiten evaluar y cuantificar el nivel de deterioro de las carreteras debido al paso de vehículos de carga, con el propósito de proyectar las actividades de conservación y protección, [2]. Respecto a puentes, se han desarrollado investigaciones sobre la evaluación del daño producido por vehículos pesados, [3]; aunque su diseño toma en cuenta la distribución y cargas máximas aplicadas por ellos, también aspectos dinámicos como la velocidad de circulación y la condición de la superficie de rodamiento adquieren un papel relevante.

Las políticas de desregulación del transporte de carga aplicadas en algunos países industrializados se han debido, en primer lugar, a la demanda impuesta por el sector industrial al requerir manejar mayores niveles de carga a distancias cada vez más grandes y, en segundo lugar, a la necesidad de disponer de vehículos de carga más eficientes y productivos.

En la década de los 70's, los Estados Unidos de Norteamérica (EUA) iniciaron un proceso de desregulación del servicio de autotransporte de carga con el propósito de incrementar la productividad en el sector. Este hecho se acentuó en la década de los 80's, cuando en algunos estados se introdujeron configuraciones más largas de vehículos pesados, adicionales a la combinación convencional tractocamión-semirremolque, [4]. A raíz de este cambio, surgieron combinaciones con semirremolques más largos, con longitudes totales de hasta 16,15 m (53 pies) utilizadas en gran parte de los EUA, con casos excepcionales como en el estado de Wyoming, donde se permiten semirremolques de hasta 18,3 m (60 pies).

Además de estas combinaciones simplemente articuladas surgieron también configuraciones multiarticuladas, con tractocamiones que arrastraban hasta tres semirremolques enlazados por diversos mecanismos de articulación. A este tipo de configuraciones largas se les denominó trenes dobles y trenes triples, también identificadas como combinaciones vehiculares más largas (LCV por sus siglas en inglés). Una situación similar se presentó en Canadá en la década de los 80's, cuando la necesidad de ofrecer un mejor servicio y la búsqueda de nuevos mercados provocó un aumento relativamente rápido de los pesos y las dimensiones de los vehículos para el transporte de carga. De hecho, en esa década el sector transporte canadiense llegó a contar con los vehículos más largos, más pesados y más anchos del mundo para el transporte de carga, [5].

En el caso particular de México, a finales de los 80's y principio de los 90's se promovió una desregulación del autotransporte federal que consistió básicamente en la liberación de rutas, de las tarifas oficiales y del control de permisos, [6]. Esto generó que las líneas transportistas de servicio pesado buscaran la demanda de los mercados para ofrecer sus servicios y, con el propósito de ser productivos, se extendió el uso de las configuraciones doblemente articuladas. Aunque en el país se ha tratado de mantener un control sobre pesos y dimensiones de los vehículos de autotransporte que circular por la red carretera federal, ese control ha ido adaptándose a los cambios a lo largo del tiempo, [7]. Las nuevas versiones de normas y reglamentos para ejercer ese control han permitido usualmente mayores pesos y dimensiones, propiciando el surgimiento de configuraciones más largas y con mayor capacidad de carga, remarcada con la circulación de configuraciones doblemente articuladas.

Aunque los cambios producidos en los marcos de la desregulación y otras políticas aplicadas al sector transporte en distintos países se orientan a elevar su eficiencia y su productividad, es un hecho que las modificaciones físicas y estructurales de los vehículos alteran su comportamiento mecánico. Cambios que representan mejoras productivas pueden alterar nocivamente el desempeño global de los vehículos, incidiendo en rubros tales como la compatibilidad con la infraestructura carretera e incrementando los riesgos de tránsito. La seguridad vehicular pudiera verse afectada por deficiencias en el comportamiento dinámico de las unidades, sobre todo ante eventos extraordinarios y situaciones que requieran maniobras de emergencia. Ejemplos de estas situaciones son los frenados repentinos, las maniobras de evasión imprevistas en la carretera y cambios de carril a alta velocidad bajo diferentes condiciones de pavimentos.

De manera congruente con los cambios sufridos por los vehículos para adaptarse a los esquemas de productividad, resulta relevante tener mayor conocimiento de su respuesta cuando están en movimiento, es decir, sobre su comportamiento dinámico. Determinar las condiciones adecuadas de operación, sus límites operativos o las características de compatibilidad geométrica y estructural de los vehículos con las carreteras, entre otros aspectos, requieren de conocer las características dinámicas de su desempeño. Sin embargo, estas tareas no son simples, resultando necesaria la dedicación específica de diversas instituciones,

las cuales han sugerido y diseñado diversas formas de evaluación del comportamiento tanto estático como dinámico de los vehículos pesados.

Dado que el comportamiento dinámico de las diversas configuraciones vehiculares puede ser sumamente complejo, investigadores del área de dinámica vehicular han identificado ciertas propiedades que caracterizan el vehículo bajo condiciones de operación bien definidas. Estas características consideran condiciones estables y transitorias, siendo las transitorias las más demandantes, ya que pudiera incurrirse en condiciones críticas de inestabilidad con riesgos potencialmente mayores en la conducción.

## **1.2 Eficiencia operacional del transporte de carga**

Los elementos fundamentales de un sistema de transporte carretero son los vehículos de autotransporte y la infraestructura carretera, es decir, caminos y puentes. Un adecuado y eficiente sistema requiere una estrecha vinculación entre uno y otra, compatibles operacionalmente, ya que uno no es aplicable si no se cuenta con el otro. En ese sentido, se afirma que las “naciones poderosas se construyen sobre las comunicaciones, mientras que los transportes constituyen su corriente sanguínea”.

Debido a la estrecha relación entre ambos elementos, cualquier cambio que se dé respecto a la diversificación del tipo de configuraciones vehiculares, repercutirá en la infraestructura carretera, y viceversa. Ejemplo palpable representa el incremento de dimensiones y pesos en los vehículos de carga pesada, que afectan y deterioran la infraestructura carretera, si ésta no se diseña para soportar vehículos con esas condiciones.

Otro aspecto importante relativo a la seguridad es el riesgo del resto de quienes utilizan las vías de comunicación, ya que al no haber compatibilidad entre las dimensiones de los vehículos de carga y el trazo geométrico de las carreteras y puentes, se podrían presentar invasiones de carriles opuestos o salidas del camino. En este sentido, se requiere conservar la armonía entre ambos, vehículos y carreteras, con previsiones que contemplen los avances tecnológicos en la evolución de los vehículos, que produce cambios con mayor rapidez que en las tecnologías de construcción de carreteras.

Derivado del trabajo realizado en el Centro para la Tecnología de Transportación en Carreteras perteneciente al Consejo de Investigación Nacional de Canadá, [8], se identificaron tres variables para evaluar la eficiencia operacional de los vehículos pesados. Éstas toman en consideración la seguridad de los vehículos al circular por las carreteras, su productividad y el daño potencial generado a la infraestructura. Por tanto, el trabajo describe que la medición de la eficiencia operacional proporciona las bases para formular y evaluar políticas regulatorias aplicables. Menciona, además, que la seguridad se puede evaluar por medio de ciertos identificadores denominados medidas o parámetros de desempeño, que

los investigadores de la dinámica de vehículos utilizan para determinar los grados de estabilidad, de control, de manejabilidad y de maniobrabilidad.

Por otro lado, se expone que la productividad es interpretada de manera distinta por el transportista y por el responsable de mantener en buenas condiciones la infraestructura carretera. Para el primero, la productividad se refiere a la razón entre la ganancia generada y los costos de operación del vehículo, mientras que para el segundo es la razón de los costos de mantener la infraestructura carretera y el beneficio unitario obtenido. En esa segunda interpretación se relaciona el daño producido a la carretera y la carga transportada, que puede expresarse a través de la carga por eje sencillo equivalente (ESAL, *Equivalent Single Axle Load*) y las toneladas de carga desplazada. Por tanto, desde esta perspectiva el impacto a la infraestructura se mide en términos del daño potencial generado al pavimento por la carga transportada, como resultado de la operación de los vehículos pesados.

El estudio concluye, por un lado, que las configuraciones de los vehículos pesados cuyos ejes en conjuntos de tres (trídem) que están más cercanos unos de otros, presentan buenas propiedades de estabilidad y control y buenas cualidades de desempeño operacional y, por otro lado, que una configuración vehicular con excelentes propiedades dinámicas no necesariamente implica un mejor desempeño operacional, [8].

Esa diferenciación en las perspectivas de la eficiencia operacional es compartida con opiniones emitidas en México en torno a tratados internacionales, [9]. Aunque se señalan que los aspectos que intervienen son de productividad, eficiencia y seguridad, éstos se discuten desde un punto de vista estadístico, particularmente aplicados sobre configuraciones simple y doblemente articuladas. Así, la productividad se evalúa de acuerdo a la capacidad de carga de los vehículos por viaje realizado, considerando las dimensiones de las unidades de carga y el número de ejes. Para la eficiencia se incluyen los costos de operación (tales como combustible, mantenimiento y llantas) y los costos de inversión. Finalmente, al evaluar la seguridad se considera el número de accidentes por millón de kilómetros recorridos y el número de viajes equivalentes, involucrando además características de maniobrabilidad como radio de giro y despiste.

En este último aspecto de seguridad, se remarca la compatibilidad que existe entre la configuración vehicular doblemente articulada y la infraestructura carretera, básicamente en términos de dimensiones geométricas. La nota concluye haciendo patente la preferencia de utilizar el tractocamión doblemente articulado sobre el tractocamión articulado debido a su mayor productividad, ya que reportan mayores volúmenes y capacidades de carga transportada y, en general, menores costos de operación. Sin embargo, en ningún momento se menciona el efecto que pudiera tener el tipo de configuración preferido sobre la infraestructura carretera, especialmente efectos dinámicos.

Estos ejemplos exponen que aunque se comparten temas en el contexto de una eficiencia operacional en un sistema integral de transporte, las interpretaciones pueden resultar con marcadas diferencias. Como se enuncia en la última parte, la principal diferencia es la consideración de los efectos sobre la infraestructura carretera, producidos por los vehículos que circulan sobre la misma. Así mismo, no se atribuyen los mismos alcances con respecto al efecto del comportamiento dinámico de los vehículos sobre la seguridad de tránsito, tema que ha alcanzado especial importancia en países industrializados.



## **2 Investigación en la dinámica de vehículos**

---

### **2.1 Pesos y dimensiones**

Desde un punto de vista estático, el objetivo principal de la evaluación de las configuraciones vehiculares pesadas yace en mantener su compatibilidad con la infraestructura carretera. Para ello se toman en cuenta aspectos como dimensiones y pesos de los vehículos, el diseño geométrico y estructural de las carreteras y la condición de la superficie de rodamiento. Desde una percepción de índole dinámica, el desempeño de un vehículo pesado se debe entender en términos de su comportamiento, a partir de las interacciones mecánicas entre sus componentes y la interrelación entre el conductor, el propio vehículo y el entorno por el que circula.

Debido a la preocupación por el adecuado diseño, mantenimiento y conservación de los puentes, principales estructuras críticas de las carreteras, se han desarrollado diversos estudios para identificar la relación entre las características de los vehículos y el daño a puentes. Se ha determinado que la carga aplicada a la estructura de un puente por un vehículo que circula sobre el mismo y los esfuerzos transmitidos a sus elementos, dependen del peso bruto vehicular, de la carga concentrada en cada uno de los ejes y de la distancia de separación entre ellos, [10].

Estas consideraciones en los análisis y evaluación de puentes han permitido considerar los primeros estudios tendientes a no dejar de lado el efecto dinámico de los vehículos en tránsito. Se han generado, por tanto, nuevos intereses técnicos relacionados con la seguridad en los que se analiza la participación de la distribución del peso en los ejes y la magnitud de las dimensiones tanto en la generación de riesgos en tránsito como en el daño a la infraestructura.

Ya que el uso de vehículos pesados con mayores pesos y dimensiones se ha extendido ampliamente debido a que aparentemente ofrecen mayores niveles de productividad, su circulación por carreteras incrementa los riesgos potenciales. Estados Unidos y Canadá, que en su momento permitieron incrementar las dimensiones y pesos de los vehículos de carga, emprendieron esfuerzos en materia de investigación y desarrollo encaminados a analizar, crear o sugerir diseños eficientes de configuraciones vehiculares, de manera que tanto los aspectos de seguridad en carreteras como el daño potencial a la infraestructura se tomaran en cuenta. Existen, por ejemplo, configuraciones equipadas con una mayor cantidad de ejes, de manera que puedan soportar mayor peso mientras que el daño a la carretera se mantenga bajo.

Desde hace algunas décadas se han orientado investigaciones tanto teóricas como experimentales al establecimiento de bases técnico-científicas que puedan auxiliar en la toma de decisiones y en el diseño de políticas concernientes a pesos y dimensiones. El principal tema de discusión gira en torno al comportamiento de

los vehículos pesados bajo condiciones dinámicas, lo que ha dado lugar al establecimiento de medidas o parámetros de desempeño. Estos parámetros se constituyen como elementos que permiten evaluar el desempeño de los vehículos pesados desde un punto de vista de ingeniería.

Países como Canadá, Estados Unidos o Australia, han volcado el interés en el estudio del sistema de transporte para definir políticas de pesos y dimensiones adecuadas, acordes con sus realidades económica y social. Los vehículos que han captado mayor atención (o tal vez preocupación), son las configuraciones multiarticuladas. El propósito de los estudios ha sido comprender su comportamiento dinámico bajo diferentes escenarios de operación, principalmente bajo enfoques de seguridad, pero sin perder de vista los aspectos de daño a la infraestructura y de productividad. El punto común de cada uno de los estudios llevados a cabo por los respectivos gobiernos, fue contar con las bases técnicas y científicas sobre el comportamiento estático y dinámico de los vehículos de carga.

México, a través de sus departamentos gubernamentales encargados de establecer las políticas para regular los pesos y dimensiones, ha intentado, legislar y reglamentar lo relacionado con los pesos y dimensiones de los vehículos pesados que circulan por la red federal, [11]. Estos intentos pudieran tener mayor sustento en el desarrollo de estudios sistemáticos y científicos, a fin de evaluar y establecer las decisiones a tomar respecto a las políticas y reglamentaciones de las dimensiones y los pesos de los vehículos de carga que circulen por la red nacional.

Cabe destacar que, con base en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte entre los países de México, Estados Unidos y Canadá, en 1998 se constituyó el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Transporte Terrestre, [12]. Este comité creó a su vez grupos de trabajo, algunos de los cuales han asumido la tarea de revisar colectivamente el papel que deben jugar criterios de comportamiento en términos de estabilidad y control de los vehículos pesados. Lo anterior con el propósito de seleccionar medidas de desempeño adecuadas para una estructuración de políticas en materia de regulación de pesos y dimensiones. Estas políticas consideran, al mismo tiempo, la compatibilidad o armonía que debe existir entre las diferentes configuraciones con la infraestructura carretera (pavimentos y puentes), sin subestimar la operación segura de los vehículos.

## **2.2 Desempeño de los vehículos**

La evaluación del desempeño dinámico de vehículos pesados y unidades de transporte por carretera en distintas combinaciones y configuraciones, se han encaminado a determinar del efecto que tienen sobre su estabilidad y control direccional condiciones de manejo extremas, tales como cambios bruscos de dirección o frenados imprevistos. Estos estudios han resultado de suma importancia, considerando que las consecuencias de la inestabilidad de un



vehículo pueden resultar desastrosas, especialmente si la carga representa un riesgo potencial adicional.

En los análisis de evaluación es necesario, por tanto, considerar características geométricas y propiedades mecánicas de los vehículos, como son tipo de configuración vehicular, distribución de peso por eje, dimensiones de las unidades de la configuración, ubicación y propiedades de componentes como neumáticos y suspensión, así como condiciones de operación entre las que se encuentra la velocidad de circulación, severidad de la maniobra, trayectoria, pendiente y sobre-elevación del camino y estado de la superficie de rodamiento, entre otras.

El estudio de la estabilidad de los vehículos pesados ha sido tema de investigación que se ha mantenido hasta los días actuales. Aspectos relacionados con problemas de quiebre o acodillamiento entre las unidades de los vehículos articulados (*jackknifing*), de desviaciones laterales o “coleo” de la parte trasera de (*swing*), de desviaciones de la trayectoria de los ejes posteriores de las unidades con respecto al eje direccional (despiste), de oscilaciones verticales o “brincoteo” de las unidades articuladas (*pitch*) y de la tendencia a la volcadura (*roll*), son algunos de los temas en los cuales muchos centros de investigación en transporte mantienen un interés permanente.

Debido a la magnitud de las masas que involucra la experimentación con vehículos de carga reales, se han hecho esfuerzos por tratar de simular numéricamente su comportamiento dinámico. Los intentos por obtener modelos sencillos y de fácil utilización que representen la generalidad de los vehículos pesados articulados, han sido innumerables. Algunos de estos esfuerzos han rendido frutos particulares, entre los que destacan los análisis específicos para diversos escenarios de la problemática de la dinámica vehicular.

Los primeros estudios emprendidos en la determinación del comportamiento de los vehículos fueron encaminados a la determinación de propiedades específicas clásicas, como la masa y el centro de gravedad con un enfoque meramente estático. En la refinación de estos estudios, se extendieron los alcances a la determinación de propiedades de mayor complejidad, como es el caso de las rigideces de los neumáticos, que afectan el cambio de dirección del vehículo, la rigidez de las articulaciones y las particularidades de los ciclos de carga y descarga de las muelles de la suspensión.

Como producto de toda esta gama de investigaciones se han identificado aspectos importantes que definen el comportamiento dinámico tanto de unidades tractivas como de remolcadas y su combinación. A lo largo de tales estudios se han introducido distintas consideraciones para aplicar una técnica de análisis teórico adecuada. Con ello surgieron distintos modelos que parten de aspectos simplificados para realizar estudios de características aisladas, a fin de establecer manuales de estas características con un comportamiento predictivo, [13, 14], con objeto de unificar modelos de mayor complejidad.

Tal vez las primeras investigaciones en este sentido se dieron a final de la década de los 1930's, en la que se realizaron estudios experimentales de estabilidad direccional en línea recta de una combinación tractocamión-semirremolque, [15, 16, 17]. Dichos estudios utilizaron modelos a escala real colocados sobre una banda sinfín, con semirremolques de dos ejes y soportados por una mesa rotatoria. Poco tiempo después se desarrolló un estudio teórico que consideró una primera aproximación del efecto de los neumáticos, simulando las fuerzas desarrolladas como generadas por un amortiguamiento del tipo "Coulomb" o friccionante, [18].

Más tarde, en los años 1950's fueron atendidos estudios independientes con enfoque similar sobre la estabilidad de vehículos articulados, como análisis del "serpenteo" que sufre un remolque de un eje sencillo de dos llantas, cuando éste es jalado por otro vehículo, [19, 20], incluyendo mecanismos direccionales de tipo Ackerman, [21]. Posteriormente, de manera gradual se analizaron esquemas más elaborados, como el estudio de identificación del efecto de parámetros particulares sobre las oscilaciones laterales de un tren vehicular, compuesto de una unidad tractiva y varios remolques idénticos de 4 ruedas en dos ejes, [22], y el efecto de la variación de diferentes parámetros sobre la estabilidad direccional de este tipo de trenes de gran longitud, consistente de un tractocamión, de un semiremolque y de un remolque, con énfasis en la localización de la quinta rueda, la longitud del semitrailer y otros parámetros que incidían en la estabilidad direccional del vehículo, [23].

Por su parte, otros problemas relacionados con la estabilidad han tratado de atacarse con modelos matemáticos sumamente sencillos, como es el caso de la modelación del acodillamiento (*jackknifing*) empleando ecuaciones lineales del movimiento, cuyos resultados difirieron del comportamiento observado en vehículos reales, [24]. Sin embargo, en el intento por entender y modelar mejor el problema, el grado de complejidad ha ido incrementándose al paso de los años, como sucedió al modelar un tren vehicular compuesto por tres unidades pero con una mayor cantidad de suposiciones, [25]. La simplificación de tales suposiciones requerían la no consideración del rebote, de la tendencia a la volcadura ni del brincoteo de las unidades individuales, además de tomar en cuenta la carga constante en las llantas de dirección durante una curva y despreciando los ajustes para el alineamiento de las llantas en el eje de dirección. En otras investigaciones se introdujeron condiciones externas al sistema propio del vehículo que interactúan con éste, como la inclusión de varias fuerzas de resistencia al movimiento (resistencia del aire, resistencia a la rodadura, comportamiento mecánico de las llantas), la interacción conductor-vehículo durante la operación de frenado y la manipulación tractocamión-semirremolque, aspectos relacionados con el control para conservar la trayectoria, [26].

Estos resultados, considerados preliminares en este campo, dieron origen a nuevos y variados estudios que mantuvieron la línea de investigación con un mayor grado de detalle y sobre unidades específicas. Tal es el caso del problema del *jackknifing* generado a partir de estudios de la dinámica de un tractocamión-

semirremolque, en los que se considera el cambio de los valores de la dirección con el tiempo para el eje de dirección, así como la variabilidad de las fuerzas de frenado en cada llanta y algunas características de amortiguamiento en el punto de conexión entre el tractocamión y el semirremolque (quinta rueda), [27]. Con este enfoque se realizó una comparación entre el uso de las ecuaciones del movimiento en forma lineal y en forma no lineal, lo que permitió ver la influencia de las no linealidades en el análisis del comportamiento dinámico.

A partir de ello, se han hecho nuevos planteamientos que incluyen otras modalidades del análisis de vehículos, como es la inclusión de características de traslación, coleo, volcadura y brincoteo en ambas unidades, tractocamión y semirremolque, [28]. También se desarrollaron los primeros programas de simulación para estudiar la estabilidad lateral y la estabilidad a la volcadura de vehículos pesados de una sola articulación, [29]. Este tipo de resultados sirvió de base para la realización de pruebas experimentales con un vehículo a escala normal y validar modelos desarrollados.

En el camino de la modelación, otro enfoque fue el relacionado con la estabilidad lateral de combinaciones de doble articulación, en términos de la respuesta en frecuencia y de las raíces características de modelos simples, [30]. Algunos resultados mostraron que la combinación vehicular es más inestable cuando el último remolque está cargado y el primero está vacío, pero que la estabilidad aumenta a medida que el ancho entre llantas en el mismo eje se incrementa. Además, las investigaciones se extendieron al desarrollo de programas para simular vehículos pesados multiarticulados, con hasta tres puntos de articulación y un máximo de nueve ejes, [31]. Estudios más específicos trataron el efecto del tipo de llanta sobre la estabilidad, enfatizando las diferencias en llantas típicas de vehículos de pasajeros, [32, 33, 34].

En etapas subsecuentes se refinaron modelos analíticos para evaluar la dinámica direccional de las combinaciones vehiculares comerciales, considerando hasta ocho grados de libertad e incluyendo comportamientos lineales tanto de las suspensiones como de las fuerzas laterales desarrolladas por los neumáticos, pero despreciando el cabeceo y la transferencia lateral de carga, [35]. En este estudio en el que se simuló una maniobra de cambio de carril, se concluyó que las combinaciones multiarticuladas con distancias entre ejes largas, poca carga vertical soportada por los neumáticos y una corta distancia entre el último eje del semirremolque y la combinación gancho pinzón-ojo de lanza inmediata posterior, podrían lograr un desempeño dinámico satisfactorio para este tipo de maniobra en particular. Sin embargo, una lanza de arrastre larga producía grandes amplitudes de oscilación lateral del último semirremolque de la combinación.

Otros estudios en el mismo contexto de las inestabilidades laterales, enfocaron la atención sobre el coleo de las unidades posteriores y su efecto antes de alcanzar el umbral de la volcadura, [36]. En ellos se involucraron características más detalladas del mecanismo del sistema de suspensión de muelles, de la influencia de sus propiedades mecánicas en los ciclos de carga y descarga durante el

movimiento y de la rigidez del sistema de suspensión, que afecta de manera significativa las inestabilidades del coleo.

La tendencia de las investigaciones cada vez más detalladas, dieron lugar a particularizar los análisis sobre aspectos puntuales que intervienen en el comportamiento de subsistemas y componentes de un vehículo, los cuales contribuyen en buena medida en el desempeño global. Así, se brindó especial atención a los sistemas de suspensión por muelles, con un mayor interés acerca del comportamiento no lineal de las hojas que constituyen el cuerpo de la suspensión. Estos sistemas constituyen por sí mismos un complicado mecanismo productor de fuerzas, interviniendo características del nivel de respuesta a la carga, los ciclos de histéresis, amortiguamiento y fricción seca entre las hojas, así como las maneras de modelar el sistema, [37].

El desarrollo de las investigaciones ha ido respondiendo a las necesidades y cambios en el desarrollo del sector transporte. Para acotar los descubrimientos en torno a los estudios realizados previos a la década de los 1980's, se presentó una revisión sobre los alcances de las investigaciones de la dinámica de vehículos pesados en las tres décadas previas, [38]. La revisión concluyó que pocos estudios trataban acerca de la dinámica direccional y, debido a la desregulación en las políticas de pesos y dimensiones en el rubro de transporte pesado, los camiones unitarios y las combinaciones de tractocamión-semirremolque fueron complementados con configuraciones más pesadas y más largas, tales como las combinaciones multiarticuladas. Estos nuevos tipos de configuraciones presentaron diferentes comportamientos en las carreteras, exhibiendo algunas de ellas comportamientos que ponían en riesgo la seguridad en las carreteras.

Estas revisiones mantuvieron el interés por los estudios en vehículos articulados, así como por el notable incremento en los movimientos laterales de la última unidad de combinaciones multiarticuladas. Así, se continuaron estudios en este tipo de configuraciones, como el de la doblemente articulada que incorporaba un mecanismo de articulación a base de un convertidor denominado tipo A, llevándose a cabo algunos estudios teóricos y experimentales para conocer en detalle su comportamiento. Experimentalmente, se realizaron pruebas bajo dos maniobras específicas de cambio simple y doble de carril, ejecutadas por dos configuraciones doblemente articuladas denominadas trenes A y C, respectivamente, [39]. Estas pruebas permitieron comparar principalmente los umbrales de volcadura y las tendencias de la última unidad de la combinación a amplificar sus movimientos laterales para cada una de las combinaciones. Se concluyó que la tipo C era dinámicamente más estable que la tipo A, además de que las variaciones en la holgura de la suspensión del semirremolque, así como los cambios en la longitud en la lanza de arrastre del convertidor tipo A, no afectan significativamente la estabilidad a la volcadura de la combinación.

Conforme surgían nuevas necesidades de estudio sobre características más detalladas, se involucraron las condiciones de las carreteras y la influencia de sus propiedades sobre el movimiento del vehículo, así como la interacción reactiva

entre la superficie de la carretera y el vehículo como sistema y las consecuencias de realizar maniobras en distintos tipos de pavimentos, [40, 41]. Estas investigaciones introdujeron los conceptos de centro de volcadura de la llanta y de la suspensión, encontrando también que la suspensión trasera del remolque tiene una mayor tendencia a volcar primero, seguida por los ejes traseros del tractor y finalmente el eje delantero, tendencia producida por la reacción de un par de fuerzas restauradoras cuando el vehículo describe una curva.

La utilización cada vez mayor de configuraciones multiarticuladas ha generado una creciente preocupación en materia de seguridad en carretera. Como resultado, investigadores de EUA y Canadá han llevado a cabo exhaustivos estudios, habiéndose desarrollado modelos de simulación detallados para predecir el desempeño dinámico de tales vehículos. Dichos modelos incluyen a su vez no-linealidades de los neumáticos, ya que la dinámica direccional está estrechamente relacionada con las fuerzas laterales y los pares de autoalineación generados en la interfase neumático-pavimento, [42, 43, 44].

Una de las revisiones realizadas en 1984, concerniente a la evaluación analítica de vehículos y en la modelación de los neumáticos al efectuar simulaciones dinámicas, identificó cuatro diferentes categorías de análisis del comportamiento dinámico y sus respuestas características. Estas categorías comprendieron la pérdida de control durante el frenado, la inestabilidad direccional en curvas, la inestabilidad a la volcadura y la amplificación de los movimientos laterales, con mayor incidencia en las combinaciones vehiculares multiarticuladas, [45].

En 1985, el Instituto de Investigación en el Transporte de la Universidad de Michigan y la Asociación Canadiense de Caminos y Transporte (UMTRI y RTCA por sus siglas en inglés, respectivamente), iniciaron y propusieron las bases para el desarrollo de uno de los programas de simulación más utilizados para la evaluación del comportamiento dinámico de diferentes configuraciones de vehículos de carga. Al respecto, surgieron los primeros códigos de computadora para la modelación de la volcadura estática (SRM, *Static Roll Model*), orientados al estudio de la combinación tractocamión-semirremolque, que consideraban la inclusión de las características de rigidez a la torsión de la estructura tanto de tractocamión como del semirremolque, [46].

Como consecuencia de estos desarrollos se generó un programa de simulación basado en la representación tridimensional del vehículo, el cual se identificó como el modelo no lineal "Yaw-Roll", [47]. El modelo evalúa básicamente la volcadura, el coleo y las características de respuesta direccional de diferentes configuraciones de vehículos pesados con hasta 4 unidades y 11 ejes, además de diferentes mecanismos de articulación. El programa de simulación integra las características no lineales de los neumáticos, la no linealidad de las suspensiones e incluye a su vez un modelo no lineal para representar la dinámica de la combinación conductor-vehículo, mientras que la velocidad de cruce del vehículo en cuestión se mantiene uniforme. Aunque las masas y los momentos de inercia másicos se consideraban constantes, hubo también incursiones en la investigación del

comportamiento de combinaciones de este tipo tomando en cuenta las variaciones de la masa y del momento de inercia en la dirección lateral, inherente al coleo de las unidades, [48].

Puesto que los problemas de simulación fueron superados por el avance de las computadoras en la década de los 1970's, éstas se emplearon para modelar el comportamiento de los vehículos. Así, en 1987 se presentó un estudio muy completo en materia de programas de simulación por computadora disponibles en ese momento, [49]. Dichos programas presentaban diversos grados de complejidad para predecir la respuesta direccional de vehículos comerciales articulados, en condiciones de estado estable y bajo maniobras de cambio de carril. El estudio consideró cuatro de los más conocidos programas de simulación, identificados como *Yaw-Plane*, el *TBS*, el *Yaw-Roll* y el *Phase IV*. En términos cuantitativos, el estudio concluyó que los modelos de simulación muy sofisticados, tal como el *Phase IV*, no generaban necesariamente mejores predicciones con respecto a las proporcionadas por modelos más simples, tales como el *Yaw-Plane* o el *TBS*, bajo ciertas condiciones.

El estudio también demostró que las características de respuesta transitoria de una combinación tractocamión-semirremolque, durante una maniobra de cambio de carril, eran cualitativamente similares en los cuatro modelos estudiados. Sin embargo, cuando sus resultados fueron comparados con datos de mediciones experimentales, los cuatro programas de simulación revelaron diferentes grados de discrepancia. En vista de la complejidad en los modelos de simulación y las mediciones reales, se propuso que era importante seleccionar el modelo adecuado de acuerdo con la tarea específica. Además, el estudio sugirió que para evaluar su eficiencia y funcionalidad relativas, sería de mucha utilidad realizar un estudio paramétrico exhaustivo y un análisis de sensibilidad de los modelos más sofisticados.

De las experiencias en las investigaciones previas se reconoció que las configuraciones doblemente articuladas poseían ciertas características dinámicas que limitan su estabilidad y que afectan las cualidades de manejabilidad en situaciones de emergencia. Para atender ese problema de estabilidad, se generaron estudios que proponían cambios en las configuraciones básicas de vehículos comerciales articulados, o bien nuevos diseños que mejoraran en algún grado el desempeño dinámico de las configuraciones vehiculares multiarticuladas. Se propusieron, por ejemplo, algunos diseños innovativos de convertidores como el convertidor trapezoidal, el convertidor con articulación ligada, el convertidor tipo B autodireccionable y el convertidor tipo B con direccionalidad controlada, [50].

El desempeño de estos diseños fue evaluado tanto por modelos de simulación como a través de pruebas experimentales a escala real, reportando cada uno ventajas específicas. En la misma línea se propusieron, entre otros, sistemas de dirección semiactivos para mejorar el desempeño en estabilidad de vehículos articulados circulando a altas velocidades, como el proporcionado por brazos de

extensión con acoplamiento viscoso colocados entre el tractocamión y el semirremolque, [51].

Estos estudios dieron lugar a un mayor enfoque sobre investigaciones relacionadas con la volcadura, como una consecuencia del deterioro de la estabilidad del vehículo y sus combinaciones. Así, fueron surgiendo conceptos como Reserva de Energía para Prevención de la Volcadura (RPER, *Rollover Prevention Energy Reserve*), utilizado para cuantificar el umbral de volcadura, [52, 53], además de variantes en los esquemas de investigación, como la influencia de los ejes de dirección, [54], análisis de sensibilidad de un vehículo a la volcadura [55], proporciones de accidentes en función del umbral de volcadura, [56], variantes en la aplicación de la energía disponible para la estabilidad a la volcadura, [57], así como análisis estadísticos de volcaduras reales, [58].

Debido a la complejidad del comportamiento de los vehículos pesados, especialmente los articulados y multiarticulados, se empezaron a trabajar algunos parámetros que pudieran ser utilizados para comparar con mayor precisión el comportamiento de unos y otros. De esta manera, se ejecutaron estudios en los que se emplearon parámetros específicos en la evaluación de configuraciones usadas en la industria forestal canadiense. Estos se concentraron en evaluar la razón de amplificación de movimientos laterales de la última unidad de la combinación, de la razón de transferencia lateral de carga, del despiste transitorio a alta velocidad desarrollado por la última unidad, del umbral estático de volcadura, del coeficiente de subviraje y del grado de la demanda en fricción a baja velocidad, [59, 60]. Tales estudios combinaron resultados de mediciones experimentales con análisis de modelación computacional, con base en el modelo no-lineal *Yaw-Roll*, cuyos resultados mostraron una concordancia aceptable.

Como en el caso anterior, la diversidad en la generación de modelos produjo también la necesidad de combinar resultados experimentales con estos modelos, sobre todo, parámetros como las aceleraciones laterales, utilizadas para estimar y predecir el comportamiento a la volcadura de diversos vehículos, [61]. Estas comparaciones se realizaron de manera limitada, debido a que experimentalmente no se alcanzó la volcadura debido a los riesgos y las estructuras que implicaba el proceso de prueba.

Las nuevas aplicaciones y el mejoramiento vehicular, conllevó a modelar más características de los vehículos comerciales. Aunque los sistemas se simulaban con cierta sencillez, se introdujeron cada vez mayores características mecánicas en la modelación, como es el caso de la rigidez lateral de la suspensión. Esto permitió separar las propiedades de estabilidad a la volcadura, detallando y caracterizando las propiedades de suspensiones de muelles, [62, 63], las cuales continúan siendo útiles en la modelación de vehículos pesados.

Como consecuencia de la gran diversidad de investigaciones con diferentes tipos de vehículos, se recalcó la importancia de definir medidas de desempeño, surgiendo conceptos tales como Razón de Transferencia de Carga (LTR, *Load*

*Transfer Ratio*) y Razón de Amplificación Posterior (RAR, *Rearward Amplification Ratio*), [64], además del criterio de Velocidad Crítica de Deslizamiento (CSV, *Critical Sliding Velocity*), [65].

El surgimiento de las medidas de desempeño y las restricciones de diversa índole para realizar experimentación, desencadenaron fuertemente la aplicación de los recursos de cómputo para proseguir el estudio de simulaciones de la estabilidad, simplificando los modelos mismos con objeto de reducir el tiempo de simulación, [66], mejorando los modelos y las técnicas de modelación, introduciendo sistemas de coordenadas de mayor efectividad, [67], o con la aplicación de programas de cálculo más poderosos, logrando simulaciones interactivas, [68].

Estos desarrollos dieron lugar a la introducción de dispositivos de amortiguamiento, [69], al desarrollo de programas especializados en la modelación del comportamiento dinámico de vehículos pesados, [70], al estudio de nuevas maniobras que dan lugar a la inestabilidad con diferentes configuraciones vehiculares y su relación con los accidentes, con mayor detalle en cuanto a la inestabilidad en la volcadura, pero simplificado en otras direcciones, [71, 72].

En este sentido, los investigadores en el área de dinámica vehicular alrededor del mundo han planteado, discutido y establecido algunas metodologías y procedimientos tanto de evaluación como de análisis. Además de ello, se ha tratado de definir algunos parámetros con objeto de cuantificar y comparar el desempeño o comportamiento, estático o dinámico, de diversas configuraciones vehiculares durante condiciones de operación normales y adversas.



## **3 Generalidades de las medidas de desempeño**

---

### **3.1 Respuesta direccional y estabilidad**

#### **3.1.1 Estabilidad direccional**

La respuesta direccional y el análisis de estabilidad de vehículos han sido temas de suma importancia e interés en el ámbito de la investigación sobre dinámica vehicular, que en el continente americano se da principalmente en países como Estados Unidos y Canadá. Todo vehículo que circule por carretera debe cumplir con ciertos requisitos técnicos de operación, que garanticen un nivel adecuado de estabilidad durante su uso y, por ende, de seguridad, tanto para la carga transportada como para los ocupantes. El nivel de seguridad está asociado con las capacidades físicas y mecánicas del vehículo, las cuales se reflejan en su comportamiento dinámico.

Los primeros estudios emprendidos en cuanto a la dinámica de los vehículos, se enfocaron al análisis de condiciones de estado estable o permanente. El desempeño en estado estable se relaciona con el comportamiento direccional bajo condiciones que no presentan variación con el tiempo. Sin embargo, durante la ejecución de una maniobra en la que se experimentan cambios sensibles de dirección, desde el inicio de la perturbación que produce esos cambios hasta el momento en que logra estabilizarse, el vehículo puede presentar distintos estados transitorios. El grado de manejabilidad de cualquier vehículo depende en gran medida de esos comportamientos transitorios, los cuales pueden resultar difíciles de predecir.

Las propiedades inerciales del vehículo deben tomarse en consideración cuando se analiza la respuesta transitoria. Además, el movimiento resultante en la ejecución de una maniobra direccional se origina de una combinación de movimientos en distintas direcciones, pudiendo ser desplazamientos lineales y de rotación. Frenar un vehículo pesado cuando se desplaza a lo largo de una curva o durante maniobras de cambio de dirección, pueden causarle inestabilidades laterales. Para el caso particular de vehículos articulados, dicha inestabilidad puede ser principalmente de dos tipos: coleo y acodillamiento o "jackknife".

El primer caso se refiere a la inestabilidad de la última unidad, descrita como un movimiento de zigzag, comúnmente conocido como "coleo" o "latigazo", que se debe fundamentalmente al bloqueo de sus neumáticos o al excederse la fuerza de fricción lateral disponible, llegando a la condición de deslizamiento. Bajo estas circunstancias, el operador del vehículo pesado podría recuperar el control direccional del vehículo liberando el bloqueo de esas llantas (liberación de los frenos), aunque pudiera sacrificar el control de la velocidad.

El otro tipo de inestabilidad, que resulta ser de mayor peligro, es la pérdida de control direccional. Esta inestabilidad se caracteriza por la enorme dificultad para el conductor de retener el control de la unidad, debida fundamentalmente al bloqueo total o parcial de los neumáticos traseros del tractocamión. Esta condición se deriva del empuje inercial del semirremolque sobre el tractocamión a través del punto de articulación, obligando a que se produzca un doblamiento entre ambas unidades, pudiendo haber contacto entre el costado del tractocamión con el semirremolque. De este doblamiento sobreviene el nombre de "jackknife". Estas inestabilidades pueden desencadenar, además, otras respuestas de condiciones inseguras, como la volcadura o colisiones con objetos en la trayectoria resultante del movimiento global del vehículo. Los dos tipos de inestabilidades, para el caso de una configuración de tractocamión y semirremolque, se representan en la Figura 1.

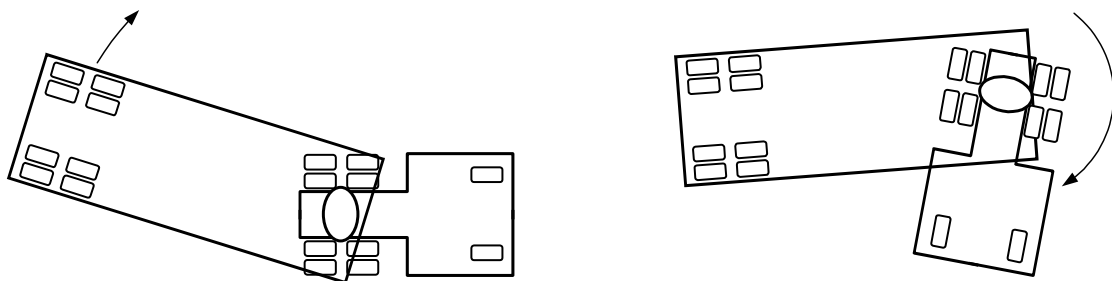


Figura 1

**Posibles inestabilidades en una combinación tractocamión-semirremolque: izquierda, coleo; derecha, "jackknife".**

Situaciones como las anteriores pueden resultar del cambio repentino en las condiciones de tránsito, incluso en la ejecución de maniobras simples como la de un cambio de carril. Estas condiciones pueden deberse a características de escenarios específicos con alteraciones meteorológicas, o en maniobras de mayor demanda, como la evasión de obstáculos y recuperación de la trayectoria, similar a un doble cambio de carril.

Para una evaluación detallada del comportamiento de un vehículo, se deben atender aspectos globales relativos a la manejabilidad, al confort y al propio funcionamiento mecánico, [13]. Tales características han sido investigadas a fin de evaluar objetivamente el comportamiento de los vehículos pesados. De estos aspectos, la manejabilidad representa una relación más estrecha con la estabilidad de los vehículos pesados y, en particular, de las configuraciones multiarticuladas.

### 3.1.2 Balanceo y volcadura

El balanceo de un vehículo se refiere al desplazamiento angular alrededor de su eje longitudinal. Este movimiento, que representa uno de los grados de libertad en el movimiento general, puede ser de tal magnitud bajo determinadas condiciones,

que alcance una situación crítica de inestabilidad que conduzca a su volcamiento. La volcadura puede ser definida como cualquier maniobra en la cual el vehículo rota  $90^\circ$  o más alrededor de su eje longitudinal, de manera tal que hace contacto con el piso, [73], debido a la acción de un par mecánico. La magnitud del par presente durante el movimiento puede obtenerse a partir de la aceleración lateral experimentada por el centro de gravedad. Debido a esa consideración, la aceleración lateral resulta ser un indicador de la tendencia a la volcadura.

La volcadura se debe a uno o varios factores, pudiendo aún ocurrir en superficies planas y uniformes, en las que la aceleración lateral puede alcanzar una magnitud tal que las reacciones en las llantas no la puedan compensar. El proceso de volcadura es complejo, en el que intervienen fuerzas de interacción entre componentes del vehículo y externas a éste, mismas que son influenciadas por las maniobras y el camino. Debido a la complejidad del proceso se ha considerado apropiado definir el inicio de la volcadura cuando las llantas de un lado del vehículo pierdan contacto con el piso. Entre otros, algunos de los factores que intervienen en la volcadura son:

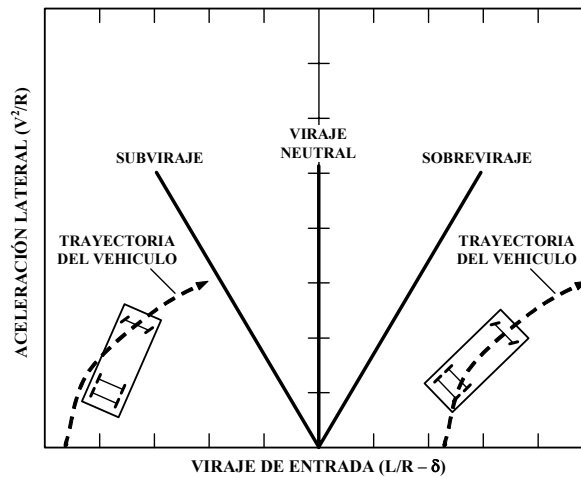
- Ubicación del centro de masa
- Distancia de separación entre los neumáticos extremos de un mismo eje
- Rigidez de la suspensión y altura de su centro de giro aparente
- Propiedades mecánicas de los neumáticos
- Grado y peralte de la curva

Como se puede observar, la lista anterior incluye únicamente algunos de los factores que presentan propiedades fijas que, a primera instancia, no pueden modificarse. Otro factor significativo que puede ser controlada por el conductor, es la velocidad de desplazamiento. Así, cuando un vehículo describe una trayectoria curva, la aceleración lateral del centro de gravedad puede obtenerse a partir de la velocidad de desplazamiento y de las características geométricas de la curva descrita.

## 3.2 Manejabilidad de un vehículo

La manejabilidad de un vehículo se refiere a la capacidad de respuesta ante los cambios de dirección requeridos durante su avance para el seguimiento de una trayectoria, es decir, con la rapidez con que el vehículo se alinea a una trayectoria curva al manipular el volante de dirección y, por tanto, las llantas direccionales. La manejabilidad puede mostrar tres condiciones, denominadas subviraje, viraje neutral y sobreviraje, siendo una de las técnicas utilizadas para su determinación la obtenida a través de un diagrama como el de la Figura 3.2, que representa un caso lineal. Esencialmente, el diagrama de manejabilidad se elabora en función de la aceleración lateral a la que es sujeto el centro de gravedad y la orientación longitudinal del vehículo con respecto a la de las llantas direccionales al seguir una trayectoria curva. Para ello, se consideran parámetros geométricos del movimiento

como la velocidad de avance ( $V$ ), el radio de curvatura ( $R$ ), la distancia entre ejes ( $L$ ) y la orientación de las llantas direccionales ( $\delta$ ).

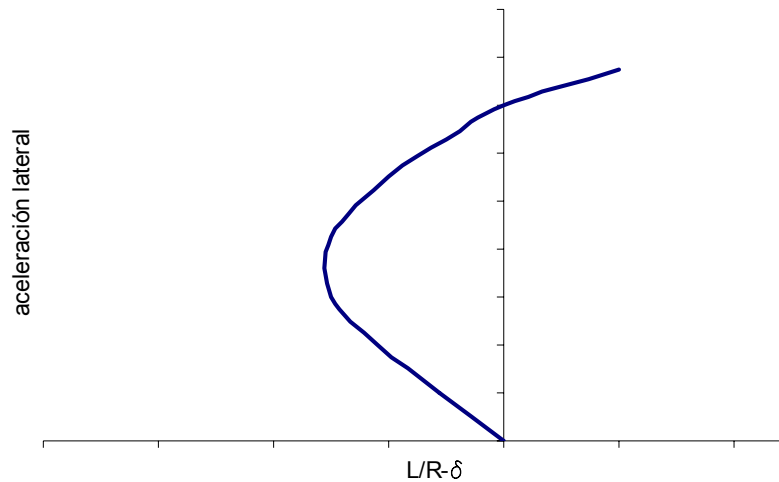


**Figura 3.2**  
**Diagrama de manejabilidad (caso lineal).**

La condición de subviraje se asocia con una respuesta direccional lenta, en la que se requiere manipular el volante de dirección con mayores intervalos de giro para mantener el vehículo sobre una trayectoria curva. En el sobreviraje, caso opuesto, se requiere un menor giro del volante para ajustarse a la curva, teniendo, por tanto, una respuesta direccional rápida con respecto a la velocidad de avance. El viraje neutral representa la condición intermedia, en la que la orientación del vehículo para seguir la trayectoria no es afectada por los cambios de velocidad.

Puesto que la respuesta direccional, como se observa de la gráfica, relaciona la aceleración lateral experimentada con la orientación global del vehículo, la condición de manejabilidad puede también obtenerse a partir de la pendiente de la curva generada, [13]. De esta manera, una pendiente negativa implicará una cualidad de subviraje, mientras que una pendiente positiva corresponderá a sobreviraje. Una pendiente infinita representa entonces el viraje neutral.

Aunque el ejemplo anterior representa condiciones ideales, alteraciones o comportamientos complejos en la magnitud y la distribución de la carga, de la velocidad, las propiedades de las llantas y del sistema de suspensión, pueden en la práctica provocar que un mismo vehículo presente variaciones en su manejabilidad, de acuerdo a sus condiciones geométricas, mecánicas y de operación. Ese comportamiento puede dar lugar a diagramas como el mostrado en la Figura 3.3, cuya curva incluye las diversas condiciones de viraje.



**Figura 3.3**  
**Diagrama general de manejabilidad**

Aunque es difícil modificar muchos de estos parámetros, normalmente el manejo de la magnitud de la carga, de su distribución y de la velocidad de desplazamiento, están al alcance del usuario de un vehículo. Para el caso concreto de vehículos pesados, una respuesta direccional muy rápida podría incrementar el riesgo asociado a la pérdida de control durante un cambio direccional, por lo que es preferible que presenten una condición de subviraje.

### 3.3 Medidas de desempeño

Es a partir de trabajos realizados en el área de dinámica vehicular que se han diseñado ciertos indicadores para evaluar con mayor objetividad el desempeño de los vehículos pesados. La caracterización del comportamiento respectivo demanda la determinación de diversos parámetros de índole geométrico y mecánico, llamados medidas o parámetros de desempeño. En términos generales, esas medidas ayudan a identificar las capacidades en la respuesta del vehículo ante eventos originados por situaciones repentinas durante su movimiento, a partir de los cuales se determinan sus umbrales de desempeño. Al mismo tiempo, estas medidas proporcionan información relevante sobre los posibles niveles de seguridad al circular por carretera, lo que permite acotar su comportamiento de acuerdo a las condiciones y escenarios de operación.

La necesidad de establecer un marco de medidas de evaluación de los vehículos de carga pesada ha sido identificada desde los primeros estudios relacionados con la regulación de pesos y dimensiones, atendiendo aspectos de estabilidad y respuesta del pavimento. Un conjunto inicial de medidas de desempeño se desarrolló gracias a un estudio canadiense sobre pesos y dimensiones vehiculares, [5]. Esas medidas contemplaban la estabilidad, el control, despiste y eficiencia de frenado, siendo usadas para proporcionar fundamentos técnicos sobre cambios regulatorios en las provincias de Canadá. Sin embargo, estas medidas, al igual que otras desarrolladas con la misma intención, han sido sujetas a revisión, requiriendo algunas modificaciones o surgiendo, incluso, interés en la

evaluación de otros aspectos que no habían sido tomados en consideración en investigaciones previas, [64].

Las medidas de desempeño con mayor relevancia se resumen en ocho diferentes grupos, orientados principalmente hacia la evaluación de la controlabilidad y estabilidad de vehículos articulados, [64], cuyos alcances consideran también su aplicabilidad a otros tipos de vehículos pesados. Estas medidas son:

- 1) Desempeño de manejabilidad (*Handling performance*)
- 2) Umbral estático de volcadura (*Static rollover threshold*)
- 3) Estabilidad dinámica a la volcadura (*Dynamic rollover stability*)
- 4) Razón de amortiguamiento al coleo (*Yaw damping ratio*)
- 5) Demanda de fricción (*Friction demand*)
- 6) Utilización de fricción lateral (*Lateral friction utilization*)
- 7) Despiste (*Offtracking*)
- 8) Desempeño al frenado (*Braking performance*)

### **3.3.1 Desempeño de manejabilidad**

Como se mencionó en la sección anterior, la manejabilidad es una medida concebida para evaluar la calidad relativa de la respuesta direccional de los vehículos, tanto unitarios como articulados. En este sentido, existen dos enfoques básicos sobre manejabilidad, relativos al control de la dirección del movimiento del vehículo y a la capacidad para estabilizar su dirección bajo el efecto de perturbaciones externas.

Los movimientos primarios asociados al comportamiento de la manejabilidad son los movimientos longitudinal, lateral y de coleo o zigzagueo, es decir, desplazamientos en las direcciones de avance y transversal y la rotación alrededor del eje vertical. En la práctica, el vehículo se inclina hacia un lado durante una maniobra de cambio de dirección, lo que puede provocar que las llantas direccionales alteren su orientación por esta inclinación, afectando por tanto, el comportamiento de manejabilidad. Así mismo, los movimientos de “brincoteo” y de “cabeceo” del cuerpo del vehículo pueden afectar su respuesta direccional. Las propiedades de algunos componentes, así como ciertos parámetros operacionales, ejercen un efecto considerable sobre las características de manejabilidad, como sucede con las llantas, la localización del centro de gravedad y la velocidad de desplazamiento.

Las pruebas de manejabilidad para un vehículo de carretera bajo condiciones de estado estable, pueden realizarse de varias maneras, entre las cuales se encuentran las de radio constante, las de velocidad de avance constante, las de giro direccional constante y la de giro direccional a razón constante. Durante estas pruebas se requiere medir al menos el ángulo de orientación de las ruedas

direccionales, la velocidad de avance, la aceleración lateral o la velocidad angular de coleo (zigzag), [13].

Debido a que la ejecución de estas pruebas requiere de una extensión considerable de terreno, una de las técnicas a las que se recurre para obtener las características de manejabilidad es la simulación numérica. En estos casos, conociendo con anterioridad las propiedades mecánicas y geométricas de los principales componentes del vehículo, es común simular una maniobra direccional tipo rampa, correspondiente al último de los tipos de prueba mencionado. En esta prueba se introduce un giro angular, ya sea en el volante o directamente en las llantas direccionales, que se incrementa a razón constante con el tiempo, generando una trayectoria de tipo espiral convergente. Esta maniobra también recibe el nombre de maniobra direccional tipo rampa, [64].

La representación de los datos, ya sean estos medidos u obtenidos de la simulación, se realizan a través del diagrama de manejabilidad, como el descrito en la sección previa.

### 3.3.2 Umbral estático de volcadura

Debido a la participación de la aceleración lateral en la generación del par requerido para volcar un vehículo, ésta participa en la definición básica del umbral estático de volcadura. Este umbral se refiere a la aceleración lateral máxima que puede experimentar el vehículo en una maniobra de seguimiento de una trayectoria curva en estado estable, justo antes de alcanzar la volcadura. Típicamente, la aceleración lateral se expresa en múltiplos de la aceleración de la gravedad, denotados por  $g$ 's.

El umbral de volcadura estático se puede determinar por medios prácticos, a través de una mesa inclinable, o mediante el uso de modelos de simulación validados. También se utiliza una formulación sencilla para tener una aproximación del umbral de volcadura, obtenida a partir del equilibrio de fuerzas durante el seguimiento de una curva circular a velocidad constante, expresada como sigue, [73]:

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2h}$$

Esta expresión se refiere a la relación entre  $a_y$ , la aceleración lateral, y  $g$ , la aceleración de la gravedad, en términos de la separación representativa entre las ruedas de un mismo eje (entrevía),  $t$ , y la altura desde el piso hasta el centro de gravedad,  $h$ . Este valor se estima suponiendo condiciones de una superficie plana y uniforme, tratando al vehículo como un cuerpo rígido en el que las llantas y la suspensión no tienen efecto alguno.

Esta medida es un indicador de la volcadura asociada a la simple curvatura de la trayectoria, durante la cual el vehículo simplemente excede su límite crítico de velocidad y, por tal razón, se vuelca.

### 3.3.3 Estabilidad dinámica a la volcadura

La volcadura resultante de maniobras erráticas o evasivas puede presentarse aún en caminos rectos o sinuosos. Estas acciones intempestivas generan estados transitorios que pueden sobrepasar las capacidades de desempeño de los vehículos pesados. Como casos de mayor relevancia están los relacionados con vehículos articulados, con configuraciones a base de un vehículo tractivo y una o varias unidades de arrastre. Las medidas sobre la estabilidad dinámica a la volcadura están relacionadas con la razón de transferencia lateral de carga (LTR, *Load Transfer Ratio*) y la razón de amplificación del coleo de la última unidad con respecto al primero (RWA, *Rearward Amplification Ratio*).

Debido al efecto inercial y al desplazamiento lateral de la carga por inclinación lateral del vehículo cuando se presenta un cambio brusco en la dirección de avance, las cargas soportadas por cada conjunto de llantas difieren de un lado a otro. Este efecto se cuantifica a través de la razón de transferencia lateral de carga, con el cual se compara la proporción global entre las cargas máximas soportadas por uno y otro lado de los ejes del vehículo, generadas durante una maniobra intempestiva. Denotando a  $F_z$  como fuerza vertical, indicando con los subíndices  $i$ , lado izquierdo y  $d$ , lado derecho, la razón LTR se expresa de la siguiente manera simplificada, [64]:

$$LTR = \left| \frac{\sum F_{zi} - \sum F_{zd}}{\sum (F_{zi} + F_{zd})} \right|$$

En la estimación del LTR no se incluyen las fuerzas correspondientes a la carga en el eje direccional, por lo que la suma de las fuerzas en el lado izquierdo y en el derecho es ligeramente inferior al peso bruto del vehículo. Para el caso de configuraciones con varias unidades conectadas a través de articulaciones que no transmiten el balanceo, la razón de transferencia lateral de carga se debe determinar para cada unidad que compone la configuración.

Así como son afectadas las cargas soportadas por las llantas en cada lado al realizar maniobras que involucren cambios de dirección, en combinaciones vehiculares articuladas los movimientos laterales y de coleo pueden ser de mayor magnitud en la última unidad, comparados con los experimentados por la principal. Estos desplazamientos laterales reflejan la oscilación de la última unidad, los cuales pueden generar condiciones inseguras en tránsito.

En las configuraciones articuladas, la razón de amplificación del coleo, RWA, manifiesta la tendencia de la unidad posterior de zigzaguear lateralmente a lo largo de la trayectoria de avance, o de volcarse ante maniobras de evasión de obstáculos, teniendo movimientos de mayor amplitud que la unidad tractiva. Este



parámetro se define entonces, como la razón del valor pico (positivo o negativo) de la aceleración lateral del centro de gravedad de la última unidad de la configuración,  $a_{yu}$ , entre el valor pico correspondiente de la aceleración lateral del centro de gravedad de la unidad tractiva,  $a_{yt}$ . Lo anterior, se puede expresar de la siguiente manera:

$$RWA = \frac{a_{yu}}{a_{yt}}$$

Dada la complejidad práctica para obtener estos valores, tanto el LTR como el RWA se estiman comúnmente a partir de un modelo de simulación, describiendo una maniobra direccional de cambio simple de carril.

### 3.3.4 Razón de amortiguamiento al coleo

En las configuraciones vehiculares articuladas, como parte de la estabilidad direccional de las unidades remolcadas, es importante conocer la capacidad de atenuación de las oscilaciones laterales. Esta capacidad caracteriza el nivel de amortiguamiento direccional, de manera que bajos niveles de amortiguamiento de las aceleraciones laterales resultan en movimientos oscilatorios prolongados que pueden conducir a un accidente.

La razón de amortiguamiento al coleo, YDR, describe qué tan rápido disminuyen las aceleraciones laterales en la última unidad de la configuración. Al igual que en el caso anterior, esta medición es difícil de realizar experimentalmente, por lo que la estimación se lleva a cabo a partir de modelos de simulación. Para ello, se aplica un giro repentino al volante o sobre las ruedas direccionales (parecido a una función de impulso) y se analiza la historia de la aceleración del centro de gravedad de la última unidad, [64]. De ese análisis se obtienen los valores picos representativos, de los cuales se determina el valor YDR, aplicando técnicas del tipo decremento logarítmico.

Como puede deducirse, esta medida no es aplicable a vehículos unitarios, siendo exclusiva de las combinaciones articuladas.

### 3.3.5 Demanda de fricción

Esta medida describe los niveles de fricción de las llantas en los ejes tractivos, ya sea para un tractocamión o para un vehículo unitario, cuando siguen una curva muy cerrada a una velocidad muy baja, durante cambios de trayectoria a alta velocidad o una maniobra direccional del tipo cambio de carril, [64]. La intención de esta medida es evaluar la potencialidad de que ocurra la inestabilidad lateral, que en vehículos articulados pueden conducir al “jackknife”, así como obtener posibles indicadores de desgaste excesivo de las llantas. Para el caso de la demanda a baja velocidad se aplican pruebas de seguimiento de curvas de 90°, que puede ser también aprovechada para medir otros parámetros. Para el caso de altas velocidades, la medición caracteriza el nivel de demanda de fricción

superficial límite de los ejes tractivos durante cambios de trayectoria, como cambio simples de carril, antes de llegar al deslizamiento.

### **3.3.6 Utilización de fricción lateral**

Aunque la utilización de la fricción lateral es parecida a la demanda de fricción, esta medida se refiere a la identificación de cuál eje o grupo de ejes se espera tenga una pérdida de adhesión durante una maniobra dada, denominado como “eje crítico”, [64]. Con ello, se obtienen indicadores tendientes a los riesgos de experimentar el “jackknife” u oscilación de las unidades de arrastre. Esta medida también proporciona información sobre si una maniobra en particular puede ser ejecutada completamente en una superficie dada con coeficientes de fricción superficial particulares, ya sea a baja o alta velocidad. Por tanto, caracteriza el nivel más alto de utilización de fricción lateral por grupo de ejes de un vehículo simple o articulado durante la negociación de una curva predefinida. Esta curva puede ser cerrada a baja velocidad, o un cambio de carril a alta velocidad.

### **3.3.7 Despiste**

Cuando el frente de un vehículo sigue una trayectoria curva, la parte trasera del mismo, o las unidades posteriores (si es un vehículo articulado), tienden a invadir una porción lateral en la curva descrita. Esto puede ocasionar una disminución del espacio disponible para vehículos que transitan por el mismo sitio en ese momento, o en la dificultad de evadir obstáculos en zonas de maniobra. Por tanto, el despiste se presenta como la intrusión de parte del vehículo en carriles o zonas adyacentes a su trayectoria.

La estimación del despiste se realiza en maniobras tanto en baja como en alta velocidad. Por ello, la caracterización del despiste se clasifica en despiste a baja velocidad (LOF, *Low-speed offtracking*), que evalúa la zona invadida en maniobras de seguimiento de curvas cerradas a muy baja velocidad; en despiste a alta velocidad en estado estable (HOF, *Steady state high-speed offtracking*), evaluado en el seguimiento de curvas circulares a velocidad de avance constante, y en despiste transitorio a alta velocidad (TOF, *Transient high-speed offtracking*), que se evalúa con maniobras de cambio de carril con velocidad de avance constante, [64]. De esta manera, se obtienen parámetros para tres distintos escenarios de operación que en el caso de vehículos articulados puede resultar de gran magnitud.

### **3.3.8 Desempeño al frenado**

Debido a las grandes masas en movimiento, el sistema de frenos y su desempeño son uno de los aspectos más importantes relacionados con la seguridad de los vehículos pesados. Además, el avance en las tecnologías de frenado en épocas recientes, ha generado el desarrollo de sistemas cada vez de mayor sofisticación, como es el caso de los antibloqueo, con los cuales se pretende evitar la pérdida de control direccional, asociada a la condición de deslizamiento producida por el paro súbito de la rotación de las llantas. Aunque resulta complicado establecer un

solo parámetro que describa mejor el desempeño del sistema de frenado, los parámetros utilizados en la caracterización de la eficiencia del sistema son la distancia de frenado, el tiempo de respuesta y las secuencias de bloqueo.

La distancia de frenado se refiere a la requerida para detener el vehículo después de aplicar el freno, partiendo de una velocidad determinada, bajo distintas condiciones del pavimento, principalmente seco y mojado. Durante las pruebas es necesario medir la velocidad del vehículo, la distancia de frenado, la desaceleración experimentada, la presión en la línea de control, la temperatura de los elementos frenantes y el bloque de las ruedas.

Con respecto al tiempo de respuesta, éste corresponde a la duración desde la aplicación hasta la liberación del freno, como una medida de la capacidad de acción de los actuadores del sistema. Las pruebas para determinar esta respuesta pueden ser realizadas de manera estática, monitoreando los cambios de presión en la línea.

El último de los parámetros considerados en el desempeño del sistema corresponde a la determinación de la secuencia de bloqueo de las ruedas en los ejes. Aunque la condición de bloqueo no es una situación deseable, algunos vehículos utilizan sistemas que usualmente experimentan el bloqueo de las ruedas durante situaciones de frenado por pánico, lo que puede conducir a inestabilidad direccional, [64]. Así mismo, la secuencia de bloqueo en vehículos articulados puede definir la causa de inestabilidad, llegando a presentarse "jackknife" o a la pérdida de control direccional.

Estas mediciones requieren del conocimiento y control de diversas variables, como la textura, fricción y pendiente transversal de la superficie del camino de prueba, la velocidad de avance, la distribución de la carga sobre los ejes y en ambos lados de los mismos, la posibilidad de ocurrencia de inestabilidades laterales, el estado de los elementos del sistema de frenos, la reacción del operador para aplicar los frenos; el estado de desgaste, las presiones y las propiedades mecánicas de las llantas, entre las principales.



## Conclusiones

---

Uno de los principales temas de interés en el sector transporte es la seguridad vehicular, combinado con la conservación de la infraestructura carretera. Debido a la importancia que representan los vehículos de transporte de carga por carretera, se han aplicado diversas políticas que han afectado los aspectos de seguridad en el tránsito y de los niveles de daño a pavimentos y puentes. Con respecto a la seguridad en tránsito, se han conducido investigaciones tendientes a generar criterios para conocer el desempeño dinámico de los vehículos pesados que circulan por las carreteras. De esas investigaciones han resultado algunos parámetros de evaluación, denominados parámetros o medidas de desempeño, que se utilizan para caracterizar el comportamiento dinámico de los vehículos.

El mejoramiento de la seguridad vehicular puede llevarse a cabo como una función de la estabilidad y el control de los vehículos. Las medidas de desempeño permiten evaluar, desde un punto de vista ingenieril, el desempeño de los vehículos pesados. Las mejoras pueden inducirse a través de políticas de decisión efectivas con las cuales se incrementa la productividad y una mejor administración de la infraestructura carretera. A la vez, contribuyen a brindar información para establecer criterios de decisión, en términos de pesos y dimensiones, así como de aspectos de seguridad para su reforzamiento en el tránsito por carretera.

Los desarrollos técnicos en las investigaciones en torno a la dinámica vehicular, identifican varios criterios para evaluar la estabilidad de los vehículos pesados. Dentro de los parámetros propuestos sobresalen la determinación de la manejabilidad, el umbral de volcadura, la estabilidad dinámica a la volcadura, amortiguamiento de coleo, niveles de fricción entre llanta y pavimento, despiste y de desempeño en frenado. Estos parámetros pueden ser utilizados en buena medida para definir los objetivos de las políticas de seguridad y de conservación de las redes carreteras.

Es menester, sin embargo, continuar con los estudios sobre la evaluación y caracterización del comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada, atendiendo a su evolución y a los desarrollos actuales y futuros en su fabricación. Estos estudios, como se ha expuesto, deben mantener su continuidad para alcanzar un mayor nivel de conocimiento que, comparado con otros países, pueda ser aplicado en México para disminuir los retrasos en esa área.



## Referencias

---

1. Kulash, Damian. 1996. "Roads and loads". Transportation Quarterly, Vol 50, No. 4, pp 55-66, Eno Transportation Foundation, Inc., Ladnsowne, Virginia. Citado en Organization for Economic OECD, Road Transport and Intermodal Research "Dynamic Interaction between Vehicles and Infraestructure Experiment (DIVINE)" Policy Implications.
2. Rico Rodríguez, A.; Mendoza Díaz, A. "Una estrategia para la conservación de la red carretera", Documento Técnico No. 11, Instituto Mexicano del Transporte, SCT., Sanfandila, Qro. 1995.
3. Armijo M., M. "Modernización de puentes frente a las cargas vivas actuales y los volúmenes de tránsito". Memorias del Seminario Internacional de Puentes. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro. Octubre, 1991.
4. Fancher, P.S., "The static stability of articulated commercial vehicles", Vehicle System Dynamics, 14(1985), pp. 201-227.
5. Ervin, R.D.; Guy, Y., "The influence of weights and dimensions on the stability and control of heavy duty trucks in Canada - Part 2" Technical Report, Vol. 2, Vehicle Weights and Dimensions Study. Roads and Transportation Association of Canada (RTAC). 1986.
6. "Crecimiento alarmante del transporte de grandes industrias". Revista Hombre-Camión No.43. Mayo 2000.
7. Mendoza, A.; Cadena, A. "Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas. Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la res nacional de carreteras. Estaciones instaladas durante 1991.", Documento Técnico No. 8. Querétaro, Qro. 1992.
8. Fekpe, E. S. K. "Operating efficiency of heavy vehicles". Heavy Vehicle Systems, Special Series, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 2, nos. 3 / 4, 1995. pp. 256-269
9. Gómez Vargas, Leonardo. "El Transporte en el TLC" Transporte e Industria. Asociación Nacional de Transporte Privado, A. C. Año 1, Núm. 2 julio-agosto 1998. pág. 28.
10. Fancher, P. S.; Gillespie, T.D., "Truck operating characteristics", Synthesis of Highway Practice 241. Transportation Research Board. National Research Council. Washington, D.C. 1995.
11. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. "Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en

- los caminos y puentes de jurisdicción federal”. Subsecretaría de Transporte. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de octubre de 2000.
12. North American Free Trade Agreement Land Transportation Standards Subcommittee (NAFTA-TLC). “Highway safety performance criteria in support of vehicle weight and dimension regulations: Candidate criteria & recommended thresholds”. Working Group 2 – Vehicle Weight and Dimensions Report of LTSS 2 Project Group. Discussion Paper. October 1999.
  13. Wong, J. Y. “Theory of ground vehicles”. John Wiley & Sons, Inc.; New York, USA, 1978.
  14. Department of Transportation. “A vehicle dynamics handbook for single-unit and articulated heavy trucks”. National Highway Traffic Safety Administration. DOT HS 807 185 Final Report. 1987.
  15. Huber, L.; Dietz, O., “Pendelbewegung Von Lastkraftwagen - Anhanger und ihrer Vereidung,” VDI-Zeitschrift, vol. 81, no. 16, pp. 459-463, 1937.
  16. Dietz, O. “Pendelbewegungen an Strassen-Anhangerzugen,” DKF, Heft 16, 1938.
  17. Dietz, O. “Über das Spuren und Pendeln von Lastkraftwagen-Anhangern,” Atz, vol. 41, no. 15, 1939.
  18. Zeigler, H. “Die Querschwingungen von Kraftwagenanhagern,” Ing. - Archiv, vol. 9, no. 2, pp. 96-108, 1938.
  19. Williams, D. “The mathematical theory of the snaking of two-wheeled trailers” Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Automobile Division, pp. 175-187, 1952.
  20. Sliber, A.; Paslay, P. R. “The forced lateral oscillations of trailers” ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp 516-519, 1957.
  21. Laurien, F. “Untersuchung der Anhangernseitenschwingungen in Strassinzugen,” Dissertation, TH, Hannocer, 1955.
  22. Jindra, F. "Tractor and trailer handling" Automobile Engineer, Vol. 55, pp 60-69, 1965.
  23. Jindra, F. "Handling characteristics of tractor-trailer combinations" SAE paper No. 650720, 1965.
  24. Ellis, J. R. "The ride and handling of semi-trailer articulated vehicles" Automobile Engineer, Vol. 56, pp. 523-529, 1966.



25. Schmid, I. "Engineering approach to truck and tractor train stability" SAE paper No. 670006, 1967.
26. Bidwell, J. B. "State-of-the-art- Vehicle control and road holding" SAE Paper No. 700366, 1970.
27. Mikulcik, E. C. "The dynamics of tractor-semitrailer vehicles: The Jackknifing Problem" SAE paper No. 710045, 1971.
28. Krauter, A. I., and Wilson, R. K. "Simulation of tractor-semitrailer handling" SAE paper No. 720922, 1972.
29. Nordstrom, O., Magnusson, G.; Strandberg, L. "The dynamic stability of heavy vehicle combinations" (in Swedish). VTI Rapport No. 9, Statens Vag-och trafikinstitut, Stockolm, 1972.
30. Hazemoto, T. "Analysis of lateral stability for doubles" SAE paper No. 730688, June 1973.
31. Nordstrom, O.; Strandberg, L. "The dynamic stability of heavy vehicle combinations" International Conference of Vehicle System Dynamics, Blacksburg, Virginia, Report no. 67A, Statens Vag-och trafikinstitut, Linkoping, 1975.
32. Ervin, R. D.; MacAdam, C. C.; Fancher, P. S. "The longitudinal traction characteristics of truck tires as measured on dry pavements" Report # UM-HSRI-PF-75-3, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, February, 1975.
33. Ervin, R. D.; Wild, R. E. "The noise and traction characteristics of bias-ply truck tires" Report # UM-HSRI-PF-76-2-1, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, January 1976.
34. Ervin, R. D.; Winkler, C. B.; Bernard, J. E.; Gupta, R. K. "Effects of tire properties on truck and bus handling" Final Report, Contract No. DOT-HS-4-00943, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, December 1976.
35. Nordstrom, O.; Nordmark, S. "Test procedures for the evaluation of lateral dynamics of commercial vehicle combinations" Automobile-Industrie, vol. 23, no, 2, pp. 63-69, 1978.
36. Ervin, R. D.; Nisonger, R. L.; Mallikarjunarao, C.; Gillespie, T. D. "The yaw stability of tractor-semitrailers during cornering" Final Report, Contract No. DOT-HS-7-01602, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, Rept. No. UM-HSRI-79-21, June, 1979.

37. Fancher, P. S.; Ervin, R. D.; MacAdam, C. C.; Winkler, C. B. "Measurement and representation of the mechanical properties of truck leaf springs" SAE paper No. 800905, 1980.
38. Vlk, F. "Lateral Dynamics of commercial vehicle combinations: A literature survey" *Vehicle System Dynamics*, Vol. 11, No. 6, pp. 305-325, 1982.
39. Billing, A. M. "Rollover tests of double trailer combinations" Transportation Technology and Energy Division, Ontario Ministry of Transportation and Communications, Report no. TVS-CV-82-114, 1982.
40. Ervin, R. D.; Nisonger, R. L.; Sayers, M.; Gillespie T. D.; Fancher, P. S. "Influence of size and weight variables on the stability and control properties of heavy trucks" Final Report, Contract No. FH-11-9577, UMTRI Report No. UMTRI-83-10, March, 1983.
41. Ervin, R. D. "The influence of the size and weight variables on the roll stability of heavy duty trucks" SAE Paper No. 831163, 1983.
42. Johnson, D. B.; Huston, J.C., "Nonlinear lateral stability analysis of road vehicles using Liapouov's second method" SAE, paper no. 841507, 1984.
43. Troger, H.; Zeman, K. "A nonlinear analysis of the generic types of loss of stability of the steady state motion of a tractor-semitrailer" *Vehicle System Dynamics*, 13, pp 161-172, 1984.
44. Stribersky, A.; Fancher, P. S. "The nonlinear behavior of heavy-duty truck combinations with respect to straight-line stability" *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 111, pp.577-582, 1989.
45. Nalecz, A.G.; Genin, J. "Dynamic stability of heavy articulated vehicles" *Int. J. of Vehicle Design*, vol. 5, no. 4, pp. 417-426, 1984.
46. Dill, P. A. "Static roll model user's manual" University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI, December 1985.
47. Wong, J. Y.; El-Gindy, M. "Computer simulation of heavy vehicle dynamic behavior - User's guide to the UMTRI models," Technical Report No.3, Vehicle Weights and Dimensions Study, Roads and Transportation Association of Canada, June 1985.
48. Pflug, H. C. "Lateral dynamic behavior of truck-trailer combinations due to the influence of the load" *Vehicle System Dynamics*, Vol 15, pp. 155-175, 1986.
49. El-Gindy, M.; Wong, J. Y. "A comparison of various computer simulation models for predicting the directional response of articulated vehicles" *Vehicle System Dynamics*, 16, pp. 249-268, 1987.

50. Winkler, C.B. "Improved dynamic performance of multi-trailer vehicles" Symposium on the Role of Heavy Freight Vehicles in Traffic Accidents. Vol. 3, OECD, pp. 5-19 to 5-40, 1987.
51. Kageyama, I.; Saito Y. "Stabilization of articulated vehicles by semi-active control method" The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Proceedings of 10th IAVSD Symposium. Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 17, August 1987.
52. Nalecz, A. G. "Intermediate maneuver induced vehicle rollover simulation" Final Report, TSC-U.S. DOT, Contract No. DTRS57-88-P-82668, 1988.
53. Nalecz, A. G. et al. "Development and analysis of intermediate tripped vehicle rollover simulation" ITRS Final Report, NHTSA-U.S., DOT, Contract No. DTNH22-87-D-27174, 1989.
54. Aurell, J.; Edlund, S. "The influence of steered axles on the dynamic stability of heavy vehicles" SAE Paper No. 892498, 1989.
55. El-Gindy, M.; Hosamel-deen, Y. H. "Sensitivity parametric analysis of UMTRI Static roll model" International Journal of Vehicle Design, Vol. 10, No. 2, 1989.
56. Winkler, C. B. et al, "Development of test procedure for minimum safety performance standards" University of Michigan Transportation Research Institute, August 1990.
57. Hinch, J.; Shadle, S.; Kelin, T. M. "NHTSA's Rollover Rulemaking Program-Results of testing and analysis" SAE paper No. 920581, 1992.
58. George, R. M. "Behavior of articulated vehicles on curves" Heavy Vehicles and Roads: Technology, Safety and Policy. 1992.
59. El-Gindy, M. "Dynamic behavior of a tractor/quadaxle trailer with variable length drawbar" Int. J. of Vehicle Design, vol. 13, no. 2, pp. 182-200, 1992.
60. Tong, X.; Tabarrok, B.; El-Gindy, M. "Computer-based analysis of the dynamics performance of log hauling trucks" New Developments in Axles, Steering, Suspension, and Chassis Technology, SAE SP-1128, pp. 55-65. November 1995.
61. Das, N. S.; Suresh, B. A.; Wambold, J. C. "Estimation of dynamic rollover threshold of commercial vehicles using low speed experimental data" SAE Paper No. 932949, 1993.
62. Winkler, C. B.; Karamihas, S. M.; Bogard, S. E. "Roll-stability performance of heavy-vehicles suspensions" SAE paper No. 922426, 1992.

63. Karamihas, S. M.; Winkler, C. B. "Ride performance of heavy-vehicle suspensions: Data tables" SAE paper No. 973208, 1997.
64. El-Gindy, M. "An overview of performance measurements for heavy commercial vehicles in North America" International Journal of Vehicle Design, Vol. 16, Nos. 4/5, pp. 441-463, 1995.
65. Lund, Y. I.; Bernard, J. E. "Analysis of simple rollover matrices" SAE paper No. 950306, 1995.
66. Jansen, S.; Lupker, H. "Fuel truck rollover simulation" Proceedings of the International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Munich, 1994.
67. Lieh, J. "A multibody dynamics program for truck simulation" SAE paper No. 942303, 1994.
68. Ranganathan, R.; Aia, A. "Development of heavy vehicle dynamic stability analysis model using MATLAB/SIMULINK" SAE paper No. 952638, 1995.
69. Rakheja, S.; Vallurupalli, R. K.; Woodrooffe, J. "Influence of articulation damping of the yaw and lateral dynamic response of the vehicle" Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design, Vol. 2. No. 2, 1995.
70. Sayers, M. W.; Riley, S. M. "Modeling assumptions for realistic multibody simulations of the yaw and roll behavior of heavy trucks" SAE paper No. 960173, 1996.
71. Liu, P. J., Rakheja, S.; Ahmed, A. K. W. "Dynamic rollover threshold of articulated freight vehicles" Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design Aug, 1997.
72. Dahlberg, E.; Vågstedt, N. "The advantages of a simple approach modeling heavy vehicle handling" SAE Paper No. 973264, 1997.
73. Gillespie, T. D., "Fundamentals of vehicle dynamics", Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale, PA, USA. 1994.



**CIUDAD DE MÉXICO**

Av. Patriotismo 683  
Col. Mixcoac  
03730 México, D. F.  
Tel (55) 5615 3575  
5598 5218  
Fax (55) 5598 6457

**SANFANDILA**

Km 4+000, Carretera  
Querétaro – Galindo  
76700 Sanfandila, Qro.  
Tel (442) 216 97 77  
216 96 46  
Fax (442) 216 96 71

**Internet <http://www.imt.mx>  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)**