



Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §

## INVESTIGACIÓN DEL EFECTO VIAL DE LOS EJES VIRABLES EN VEHÍCULOS ARTICULADOS : REVISIÓN DE LA LITERATURA

José Antonio Romero Navarrete Miguel Martínez Madrid Liborio Jesús Bortoni Anzures

Publicación Técnica No 263 Sanfandila, Qro, 2004

# SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Investigación del efecto vial de los ejes virables en vehículos articulados: revisión de la literatura

> Publicación Técnica No 263 Sanfandila, Qro, 2004

## Presentación

Se presenta, como parte de estudios relacionados con mejoras potenciales en los vehículos pesados que transitan por la red nacional, una revisión documental sobre el empleo de ejes virables en este tipo de unidades, la cual provee las bases para estudios específicos que permitan diseñar mecanismos y sistemas que mejoren el desempeño vial de tales vehículos.

Debe señalarse que este trabajo es el resultado de cooperación académica entre el Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Autónoma de Querétaro. Mientras que el Dr. Miguel Martínez Madrid es Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del IMT, José Antonio Romero Navarrete es profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, y Liborio Jesús Bortoni Anzures realiza estudios de doctorado en esa misma facultad.

## Índice

| Resumen<br>Abstract<br>Resumen e | iecutivo   | IX<br>XI<br>XIII |
|----------------------------------|--|------------------|
| ixesumen e                       | jecutivo   | Aiii             |
| Capítulo 1.                      | Introducción                                       | 1                |
| Capítulo 2.                      | Medidas de desempeño                               | Ę                |
| 2.1                              | Medidas de desempeño geométricas a baja velocidad  | ţ                |
| 2.2                              | Medidas de desempeño geométricas de alta velocidad | 8                |
| 2.3                              | Medidas de desempeño de estabilidad direccional y  |                  |
|                                  | lateral  | 13               |
| 2.4                              | Medidas de desempeño del efecto en el pavimento    | 22               |
| 2.5                              | Eficiencia energética                              | 27               |
| 2.6                              | Desgaste de llantas                                | 28               |
| 2.7                              | Otras medidas de desempeño                         | 28               |
| 2.8                              | Discusión  | 30               |
| Capítulo 3.                      | Tecnologías  | 33               |
| 3.1                              | Sistemas de dirección                              | 33               |
| 3.2                              | Tecnologías para ejes autovirables                 | 35               |
| Capítulo 4.                      | Revisión de la literatura                          | 43               |
| 4.1                              | Metodologías y enfoques                            | 43               |
| 4.2                              | Resultados en la literatura                        | 50               |
| Capítulo 5.                      | Conclusiones y recomendaciones                     | 97               |
| Referencias                      |  | 101              |

### Resumen

Se describen y analizan diversas metodologías reportadas en la literatura en cuanto al uso de ejes virables en combinaciones vehiculares, aunque sin tratar de manera detallada los algoritmos activos para el control de la dirección. Las bases documentales respectivas consisten en reportes preparados por diferentes instituciones para las entidades gubernamentales de las diferentes regiones donde se han llevado a cabo estos trabajos, incluyendo Australia, Asia, Inglaterra, Estados Unidos y Canadá.

Las metodologías identificadas en las fuentes revisadas exhiben distintas medidas de desempeño, las cuales se describen y discuten de manera especializada, identificando algunas de sus limitaciones. Tales medidas de desempeño incluyen aspectos geométricos y dinámicos. Los geométricos se evalúan a baja y a alta velocidad, mientras que los dinámicos tienen que ver con la transferencia lateral de carga, y con las fuerzas ejercidas sobre los pavimentos.

Respecto a las medidas de desempeño empleadas en los diferentes estudios, se identifican algunas inconsistencias que provocan una falta de uniformidad en las evaluaciones reportadas.

En forma general, los resultados muestran una mezcla de beneficios y desventajas al incorporar los ejes virables en las combinaciones vehiculares. En cuanto a los beneficios, se requiere un ancho menor para realizar las maniobras, aunque algunas respuestas se deterioran considerablemente, como es el caso de la invasión de carril por la parte trasera de los vehículos con ejes virables.

Sin embargo, la respuesta dinámica se ve favorecida con la incorporación de los ejes virables, representando importantes beneficios en lo que se refiere a la productividad del transporte al ser incorporados en combinaciones vehiculares de mayor peso y volumen. En particular, se observan ahorros potenciales en el consumo de combustible y en el desgaste de las llantas.

Se plantean como recomendaciones cuantificar experimentalmente los beneficios potenciales respecto al ahorro de combustible y el desgaste de las llantas. Adicionalmente, modelar la respuesta dinámica de vehículos equipados con estos ejes durante el frenado en curva.

Investigación del efecto vial de los ejes virables en vehículos articulados: revisión de la literatura

## **Abstract**

Road transportation safety and productivity represent crucial components for the domestic economy of nations. In this regards, different approaches have been employed to reduce transportation costs without endangering safety. Using more axles in vehicle combinations represents an important method to increase transport productivity. This approach has been employed by different countries, allowing many axles in the trailed units.

However, the inclusion of more standard axles in vehicle combinations also degrades the handling quality of the vehicles, presenting higher resistance to maneuvering. To cope with this situation, steering axles have been considered, which allow certain steering motion in order to reduce the vehicle's resistance to maneuvering. Nevertheless, such "solution" also exhibits certain limitations due to the lack of cornering force transmitted through the steering axles. A variety of mechanism has been thus proposed to counteract such deficiency.

In this work a review of the methodologies reported to evaluate the performance of vehicle combinations equipped with steering axles, is presented, including a review of the existent performance measures. Such performance measures include geometrical and dynamic responses of the vehicles, for both low and high speed situations, and the potential effect of vehicles on pavements.

Results show that with the available technologies, some vehicles responses are improved while another ones are degraded, specially with regard to the geometric low speed performances. However, in general, a better performance is attributed to the vehicles with steering axles in the trailed units, representing, moreover, important enhancements in fuel consumption and tires wearing.

A series of theoretical and experimental tasks are identified to undertake, to complement and validate some of the reported findings.

## Resumen ejecutivo

En un contexto general, en el que se buscaron de manera intensiva esquemas de transporte que resulten más productivos, es que se ideó la incorporación de una mayor cantidad de ejes en los vehículos remolcados de las diversas combinaciones existentes, atendiendo las limitaciones normativas impuestas en cuanto al deterioro de las carreteras y puentes.

Sin embargo, el incremento en el número de ejes de los vehículos conlleva degradaciones en cuanto a su comportamiento dinámico al aumentar tales ejes la resistencia del vehículo a cambiar de dirección. Una manera de resolver esta situación ha consistido en la inclusión de ejes que pueden reorientarse de acuerdo con las necesidades direccionales del camino. No obstante, esta solución enfrenta algunas limitaciones, ya que las fuerzas direccionales, básicas para poder conducir a los vehículos por las trayectorias deseadas, se ven disminuidas considerablemente por efecto de estos ejes virables.

En este trabajo se presenta una revisión de diferentes aspectos relacionados con la incorporación de ejes virables en las combinaciones vehiculares, a partir de una revisión exhaustiva de la literatura. Los reportes analizados consisten básicamente de escritos para instituciones gubernamentales de aquellos países donde se llevaron a cabo los estudios. Por su parte, las metodologías identificadas en la literatura relativas al comportamiento de los automotores con ejes virables, se basan por lo general en modelos matemáticos y evaluaciones paramétricas exhaustivas de tales modelos.

Las medidas de desempeño empleadas por los distintos autores incluyen el comportamiento geométrico a baja y alta velocidad, así como otras relacionadas con la tendencia a la volcadura. De manera particular se presenta un cúmulo de aproximaciones para evaluar el efecto potencial de los vehículos sobre las infraestructuras carreteras.

Los resultados atienden intereses particulares de las distintas investigaciones, sesgándose algunas de ellas a la productividad, y otras al efecto de los vehículos sobre el pavimento. No existe una uniformidad en cuanto a las medidas de desempeño aplicadas por los autores, salvo en el despiste a alta velocidad y el umbral estático de volcadura.

Los estudios revisados dejan ver las ventajas y desventajas de la incorporación de los ejes virables en lo que toca a la seguridad vial. De esta manera, mientras que las ganancias respecto al ancho total de barrido se dan en un rango de unos cuantos puntos porcentuales como resultado de la incorporación de ejes virables;

otras medidas de desempeño, básicamente el barrido de la zaga, exhibe incrementos notables asociados a dichos ejes.

Sin embargo, de acuerdo con la mayoría de las fuentes, la incorporación de ejes virables representa mejoras globales en el desempeño de los vehículos. Esto incluye el aspecto de productividad, que implica ahorros potenciales de combustible y un alargamiento en la vida de las llantas.

Se discute la posibilidad de incluir alguna configuración de eje autovirable diferente en algunos tramos carreteros nacionales. En particular, se aprecia atractivo emplear en los semirremolques un eje autodireccional, delante de un grupo tándem.

Como resultado del análisis de las diferentes medidas de desempeño y productos revisados, se incluye un grupo de recomendaciones en torno a los ejes virables en México, a saber: modelado teórico-experimental del efecto de los vehículos sobre los pavimentos, y consumo de energía; y el modelado teórico-experimental del desempeño dinámico vehícular en maniobras de emergencia.

Al respecto, se propone un proceso para evaluar el efecto potencial de los tractomotores sobre el pavimento, que considere los esfuerzos tangenciales llanta-pavimento, como uno de los aspectos alterados por los ejes autovirables. Para ello, se partiría de una metodología energética del Instituto Mexicano del Transporte, la cual toma en cuenta la respuesta dinámica del pavimento a las cargas dinámicas de los vehículos.

Se plantea asimismo, una instalación experimental que permita cuantificar el efecto de los ejes direccionales en el pavimento, así como el desgaste de las llantas y el consumo de combustible.

Para modelar la respuesta de unidades con ejes virables ante situaciones de emergencia, se considera la conveniencia de aplicar un programa existente (*yaw-roll*) o desarrollar uno propio, tomando en cuenta un programa de ejes fijos del Instituto Mexicano del Transporte.

## 1 Introducción

A nivel general se ha reconocido la importancia de contar con sistemas de transporte carretero eficientes y seguros (Torres, 2000; Schade y Rothengatter, 2003; McCullough, G J, 2003), lo que se ha reflejado en una serie de alternativas tecnológicas enfocadas a mejorar diversos aspectos del transporte.

Los cambios en los esquemas de movimiento carretero de carga han abarcado diferentes rubros, incluyendo los aspectos normativos y los esquemas económicos. Estos diferentes asuntos incluyen los estudios de pesos y dimensiones de los vehículos, y los diversos marcos jurídicos para el empleo de los mismos.

Una alternativa tecnológica para el transporte carretero ha consistido en incorporar una mayor cantidad de ejes en los vehículos, tratando de incrementar la carga útil desplazada y mantener niveles adecuados de "descargas" en cada uno de los ejes. Son dos las limitantes normativas respecto al número de ejes a emplear en los vehículos, lo que incluye la separación entre tales ejes.

Por un lado, la separación de los ejes está ligada al efecto potencial de los vehículos hacia los pavimentos; de tal suerte que una mayor separación de éstos es "premiada" por la normatividad, con una mayor carga permitida. Por otro, el espacio ente eje y eje también depende del efecto potencial de las unidades sobre los puentes, de tal suerte que una mayor distancia inter-ejes es también considerada en la perspectiva de disminuir la magnitud de los momentos flexionantes ejercidos por los vehículos en los puentes. Los criterios que determinan la separación de los ejes y su relación con los pavimentos provienen de pruebas de la *American Association of State Highway and Transport Officials* (AASHTO)(HRB, 1962), mientras que las cargas y separación de los ejes en los puentes está regida por la Fórmula Puente (FHWA, 1985).

Existen otros elementos a considerar en cuanto a la incorporación de ejes en los transportes de carga, que se refieren a la facilidad con que tales unidades son manejadas. La incorporación de más ejes "estándar" en un vehículo representa un incremento en la rigidez direccional de éste, con lo que se incrementa la dificultad para que la unidad cambie de orientación direccional, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.1, en la cual se aprecia la resistencia del vehículo al cambio de orientación direccional, en la medida en que se aumenta el número de ejes.

Para enfrentar esa situación de rigidez direccional, se han diseñado diferentes esquemas, como son el empleo de ejes que tengan la capacidad de virar por efecto del avance del vehículo en una trayectoria curva, o mediante incorporar mecanismos que "eleven" a los ejes que dificultan la maniobra direccional.

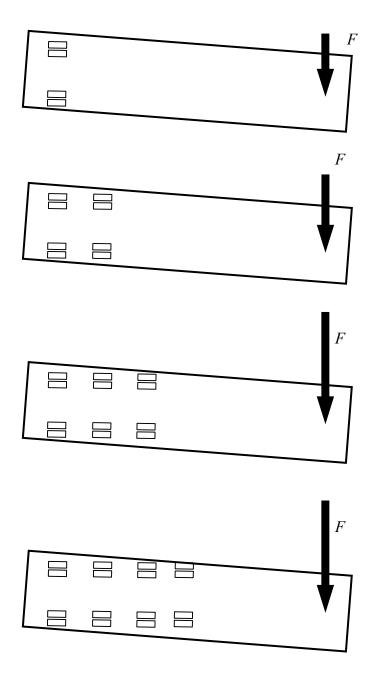


Figura 1.1. Efecto del número de ejes sobre la fuerza para provocar un cambio direccional

De entre estas soluciones, la más conveniente es la de emplear ejes que puedan ser reorientados en alguna cantidad, ya que la retractibilidad de los ejes significa que el peso bruto vehicular es soportado con menos apoyos, lo que aumenta el efecto nocivo en las infraestructuras, sean pavimentos o puentes.

Aparentemente, el recurso de ejes virables se dio originalmente en los carros de bomberos, por transportar largas escaleras a lo largo de las relativamente estrechas calles de las ciudades. Otras aplicaciones incluyen los equipos llamados montacargas, empleados en las empresas para transportar equipos y materiales en áreas estrechas.

Estos esquemas de ejes virables se caracterizan por ser forzados o comandados; esto es, responden a las acciones de un volante direccional. Esto es notable en el caso de los carros de bomberos antiguos. Sin embargo, el empleo de ejes comandados es difícil de impartir en los transportes de carga en general, dados los costos y dificultades técnicas, aparte de afectar la seguridad vial y la estabilidad direccional, ya que la falla de tales sistemas aumenta la probabilidad de que los vehículos den "trompos".

De esta forma, los ejes autovirables efectúan su acción por el punto de giro que presentan, mismo que está por detrás del punto de arrastre, como se muestra en la figura 1.2. En la alineación de los automóviles, esta distancia permite dar estabilidad al movimiento, denominado avance (*caster*).

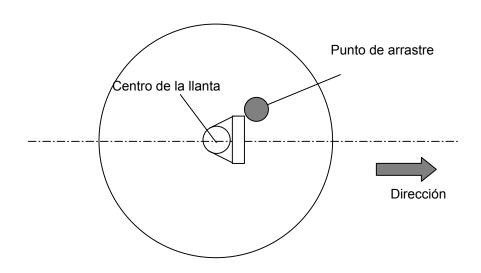


Fig 1.2. Eje autovirable, acción del avance en la rueda (*caster*)

Sin embargo, presentan dificultades, ya que la capacidad para reorientarse durante el trayecto en curva, significa que la fuerza efectiva que los vehículos disponen para dar vuelta disminuye considerablemente, implicando afectaciones a la estabilidad direccional de los mismos. De esta forma, se han desarrollado varios mecanismos para incrementar las fuerzas de viraje en las combinaciones vehiculares, como el de autocentrado, que favorece el retorno del eje autovirable a la posición neutra, con lo que se propician las fuerzas de viraje.

En cuanto al empleo de los ejes retráctiles en las combinaciones vehiculares, cabe mencionar un caso interesante. En Canadá, con objeto de incrementar la productividad del transporte con base en un mayor número de ejes, se fomentó a principios de los noventas el uso de ejes retráctiles en el trayecto normal del vehículo a efecto de cubrir la descarga por eje, siendo posible su elevación al circular por caminos estrechos a baja velocidad, o maniobrar en zonas urbanas. Sin embargo, aparentemente no ha sido la utilización de los ejes retráctiles como se esperaba, y el gobierno está restringiendo su uso. Tal vez es que supuestamente se hizo un abuso de tales modalidades tecnológicas, magnificándose durante esa época el deterioro de los pavimentos.

En este trabajo se presenta una revisión del estado del arte en cuanto a las metodologías y resultados reportados en la literatura acerca de ejes virables en combinaciones vehiculares.

En el Cap 2 se desarrolla una revisión de las medidas de desempeño, para evaluar de manera integral a los equipamientos, incluyendo aspectos geométricos y dinámicos. Los dinámicos incluyen el efecto potencial de los vehículos en los pavimentos, el consumo de combustible y el desgaste de las llantas.

El Cap 3 presenta las tecnologías disponibles para la aplicación de los ejes autovirables.

Por su parte, en el Cap 4 se incluye una revisión de las metodologías y resultados reportados por grupos interdisciplinarios alrededor del mundo. A manera de conclusiones, en el Cap 5 se presentan una serie de limitaciones de los estudios revisados, identificándose un conjunto de aquellos para evaluar de manera integral a los ejes virables en las combinaciones vehiculares.

## 2 Medidas de desempeño

Se presenta una revisión de las medidas de desempeño para evaluar el comportamiento vial de los vehículos articulados con uno o más ejes virables en las unidades remolcadas. Se han agrupado estas medidas de la siguiente manera:

- · Geométricas a baja velocidad
- Geométricas a alta velocidad
- De la estabilidad direccional y lateral
- Del efecto en el pavimento
- De la eficiencia energética
- Del desgaste de llantas
- · De situaciones extremas

La sección de situaciones extremas se refiere a la aplicación de métodos de prueba normalizados para evaluar la respuesta de las combinaciones vehiculares a perturbaciones que combinan cambio de velocidad (frenado), con cambio de dirección.

Asimismo, se incluye una discusión sobre las medidas de desempeño descritas respecto al efecto de los vehículos en el pavimento al realizarse maniobras direccionales.

Se reconoce que en la literatura se han reportado diferentes definiciones para las medidas de desempeño, por lo que en esta investigación se trata de armonizar tales definiciones.

Mientras que a baja velocidad ciertas características del vehículo, en cuanto a la flexibilidad de sus llantas y suspensiones no afectan mayormente el comportamiento de los diferentes cuerpos vehiculares, al tratarse básicamente de la respuesta cinemática de cuerpo rígido del vehículo; en las maniobras a mayor velocidad (más de 80 km/h), las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los componentes de la unidad definen la respuesta general del mismo.

# 2.1 Medidas de desempeño geométricas a baja velocidad

Los aspectos de seguridad que atienden estas medidas de desempeño tienen que ver con la invasión, por parte de los ejes y carrocería de los vehículos, de los espacios adyacentes del camino durante la ejecución de diferentes maniobras a baja velocidad.

#### Despiste a baja velocidad (DBV)(Low speed offtracking)

De acuerdo con Billing (2003), se define como la magnitud del despiste o desplazamiento interior de la huella del último remolque respecto a la trayectoria del eje delantero del tractor, al ejecutarse una vuelta derecha de 90° en una intersección típica. Se tienen diferentes reglas en cuanto al radio de la curva sobre la cual tiene que ejecutarse la maniobra, estableciendo una de ellas que el despiste no debería ser mayor de 6 m para una vuelta con un radio de 11 m. De acuerdo con Billing, tal especificación de máximo despiste no resulta conveniente en algunos casos, por representar una vuelta demasiado cerrada para ciertos vehículos.

Por otra parte, Coleman y Sweatman (2002) definen al DBV como la máxima distancia, que va desde la trayectoria del último eje hasta aquella de la trayectoria del eje virable del tractor, en una vuelta a baja velocidad con ciertas características.

La figura 2.1 ilustra el DBV de acuerdo con Billing (2003).

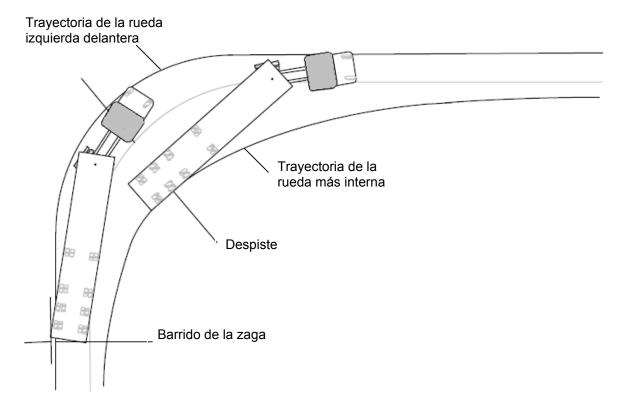


Figura 2.1.

Despiste a baja velocidad (Billing, 2003)

#### Ancho total del barrido ATB (*Total swept path width*)

Jujnovich y Cebon (2002) describen el ATB, como el ancho máximo de la trayectoria barrida por el vehículo en el momento de dar vuelta en una esquina.

De acuerdo con Coleman y Sweatman (2002), el ATB es el desplazamiento lateral máximo entre la trayectoria de la esquina exterior delantera del vehículo o unidad vehicular, y el filo delantero exterior de la rueda direccional exterior delantera de la unidad de arrastre, durante una maniobra de vuelta en un radio pequeño, realizada a baja velocidad. Al respecto, se menciona que existen algunas omisiones respecto a esta medida de desempeño si se toman en cuenta la acción de los ejes traseros comandados o virados de manera forzada, refiriéndose ello a que dichos ejes se desalinean durante la maniobra a baja velocidad, cambiando el punto de referencia del vehículo, el cual se va hacia el interior de la curva.

La figura 2.2 muestra la definición para el ancho total de barrido.

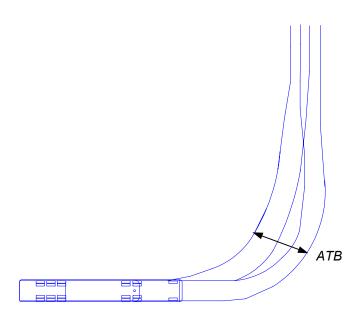


Figura 2.2.
Ancho total del barrido *ATB* como medida de desempeño (Coleman y Sewatman, 2002)

#### Ancho del barrido en círculo a baja velocidad

Ancho máximo de la trayectoria barrida por el vehículo mientras efectúa una maniobra en círculo (Jujnovich y Cebon, 2002). Esta medida se asemeja al ATB pero para una maniobra en círculo.

#### Barrido frontal (BF) (frontal swing)

De acuerdo con Coleman y Sweatman (2002), este barrido frontal es la desviación máxima entre la trayectoria de la esquina delantera exterior del vehículo o unidad vehicular remolcada, y aquella de la orilla delantera exterior de la rueda virable exterior delantera del tractor, durante una maniobra de vuelta en radio pequeño a baja velocidad.

#### Barrido de la zaga (BZ) (tail swing)

La figura 2.3 ilustra el barrido de la zaga para un vehículo tipo autobús durante su incorporación al camino (Ratzilla, 2005). Se define como la máxima distancia lateral que la parte trasera del vehículo se desplaza por fuera de la trayectoria de la rueda delantera.

Conforme a Coleman y Sweatman (2002),el BZ es la máxima distancia lateral que el punto exterior último sobre un vehículo se mueve hacia fuera, perpendicular a su orientación inicial, cuando da principio a radio pequeño a baja velocidad.

Billing lo nombra *rear outswing*, y lo define como el monto de intrusión de cualquier esquina lateral izquierda del vehículo en el carril a la izquierda de aquél ocupado por el vehículo durante una maniobra a la derecha, como se muestra en la figura 2.1. Se indica que la esquina izquierda es especialmente susceptible a representar un obstáculo a otro vehículo que viaje en el carril adyacente, y significa la posibilidad de una colisión a alta velocidad. Se indica que este BZ debería ser menor de 0.2 m.

Jujnovich y Cebon (2002) definen esta BZ, como la distancia lateral máxima que la parte trasera del vehículo viaja por fuera de la trayectoria de la rueda delantera. Los autores no reconocen esta medida de desempeño como una de baja velocidad.

El empleo de ejes virables tenderá a aumentar este barrido de la zaga.

# 2.2 Medidas de desempeño geométrico a alta velocidad

Se describe un conjunto de medidas de desempeño que tienen que ver con las desviaciones de trayectoria entre el vehículo tractor y los remolcados al realizar

tales combinaciones vehiculares, bajo maniobras direccionales a una velocidad relativamente alta (mayor de 80 km/h). Para algunos investigadores, la evaluación de los vehículos debe concentrarse en este desempeño a altas velocidades (Luo, 2005).

#### Despiste a alta velocidad (DAV)

Existen variantes en cuanto al nombre dado a este DAV. Por un lado, tales diferencias consisten en la acepción "dinámico" y "transitorio". De esta manera, Jujnovich y Cebon (2002) lo nombran high-speed transient offtracking, y lo definen como la máxima distancia lateral que el eje trasero se desplaza por fuera de la trayectoria del eje delantero. Por su parte, Coleman y Sweatman (2002) lo designan high-speed dynamic offtracking, y lo definen como la medida de la excursión lateral de la parte trasera del vehículo, con referencia a la trayectoria de la parte delantera del vehículo durante una maniobra dinámica.

Asimismo, Coleman y Sweatman (2002) señalan que este DAV expresa la cantidad de espacio de carretera adicional usado por la combinación vehicular en una maniobra evasiva. Los autores consideran este despiste para una maniobra de cambio de carril realizada a 90 km/h, como se muestra en la figura 2.4. El cambio de trayectoria se da a cierta velocidad del volante (25 rad/s), siendo la cantidad de desplazamiento lateral una función de la longitud de la combinación vehicular ensayada. Estos mismos autores emplean otra medida de desempeño designada como high speed offtracking, la cual difiere del high speed dynamic oftracking en las características de la maniobra ejecutada. Este high speed offtracking lo definen como la medida en la cual las llantas últimas del vehículo se desplazan hacia fuera de los neumáticos de la unidad de arrastre durante una vuelta a radio constante, ejecutada a una velocidad normal de carretera, como se muestra en la figura 2.5.

Por su parte, Billing (2003) define al *high speed offtracking* como el desvío entre la trayectoria del eje virable del tractor y la trayectoria del último eje del vehículo, durante una maniobra en estado permanente a 0.2 g de aceleración lateral, como se muestra en la figura 2.6. Se indica ahí que el riesgo carretero derivado de este despiste es que la trayectoria sesgada hacia el exterior de las llantas del remolque, pudiera provocar el impacto de los neumáticos contra una banqueta u otro obstáculo en el camino, o provocar un choque con el tránsito a contrafujo. Se recomienda que el despiste a alta velocidad no sea mayor de 0.46 m. Se indica finalmente que esta medida de desempeño es particularmente importante en el caso de los semirremolques equipados con ejes autovirables.

Al igual que Jujnovich y Cebon, Billing (2003) define adicionalmente lo que nombra transient high-speed offtracking, describiéndolo como el desvío máximo de la posición lateral del eje último del remolque, respecto a la trayectoria del eje delantero del tractor en una maniobra evasiva, como se muestra en la figura 2.7.

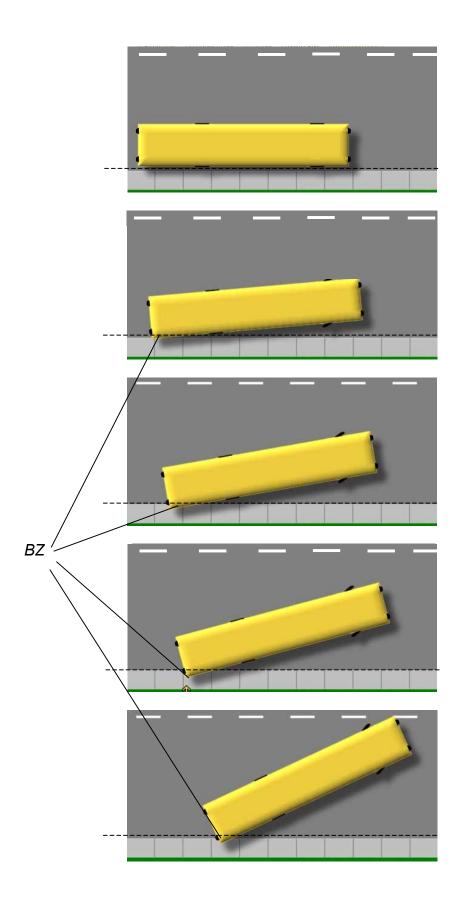


Figura 2.3. Ilustración del barrido de la zaga (BZ). (<a href="http://www.ratzilla.com/bus/tail\_swing.htm">http://www.ratzilla.com/bus/tail\_swing.htm</a>)

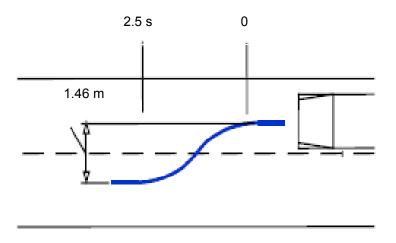


Figura 2.4. Maniobra estándar de cambio sencillo de carril

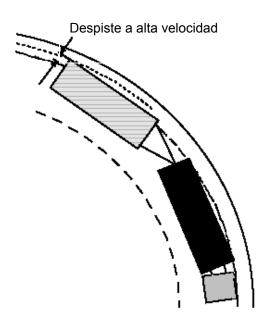


Figura 2.5. Despiste a alta velocidad de la unidad posterior respecto a la unidad de arrastre (Coleman y Sweatman, 2002)

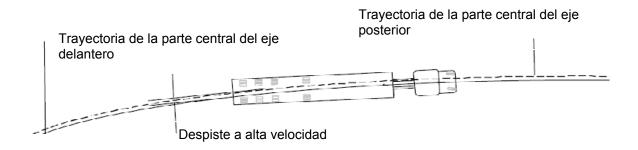


Figura 2.6. Vuelta a alta velocidad (Billing, 2003)

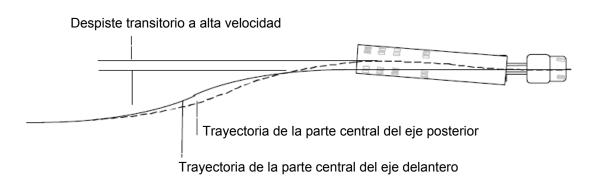


Figura 2.7. Cambio de carril a alta velocidad (Billing, 2003)

De la misma manera, los autores consideran esta medida de desempeño como un indicador del potencial del vehículo para invadir al carril adyacente, o para sufrir una volcadura al golpear alguna barrera u obstáculo de baja altura, indicando finalmente que tal medida de desempeño cuantifica la respuesta en oscilación direccional (yaw), durante una perturbación direccional rápida. Se indica que este despiste no debería ser mayor de 0.8 m. Al respecto, existió hasta septiembre de 2000 una norma SAE (Society of Automotive Engineers) sobre la prueba de cambio de carril (SAE J2179: A Test for Evaluating the Rearward Amplificiation of Multi-articulated Vehicles), misma que fue sustituida en ese mismo año por la ISO14791-2000 (Road vehicles -- Heavy Commercial Vehicle Combinations and Articulated Buses -- Lateral Stability test methods), Dicho procedimiento normativo establece una longitud para el cambio de carril de 61 m, con una aceleración lateral pico de 0.15 g (NRTC, 2005), siendo el desplazamiento lateral de 1.46 m.

En este trabajo se empelarán los términos despiste transitorio a alta velocidad (DTAV) y despiste a alta velocidad (DAV) respectivamente, para designar las

maniobras de cambio de carril y de tránsito sobre una circunferencia de radio constante.

#### 2.3 Medidas de desempeño en estabilidad direccional y lateral

Se presenta una descripción de las medidas de desempeño relacionadas con la propensión del vehículo a ser inestable, ya sea direccional o lateralmente. Mientras una inestabilidad direccional se caracteriza por la ocurrencia de "trompos", una inestabilidad lateral está representada por la volcadura del vehículo.

Como parte de la tendencia a la volcadura de los camiones, se cuenta el comportamiento estático del vehículo, representado por su estabilidad lateral estática.

#### Estabilidad lateral estática (*ELE*)

Esta propiedad de los vehículos es una característica básica para establecer la tendencia a la volcadura de los camiones, definiéndose en términos de la aceleración lateral que es necesaria para causar la volcadura del vehículo, expresando dicha aceleración en términos de la gravedad,  $\boldsymbol{g}$ , esto es, de acuerdo con Jujnovich y Cebon (2002):

$$ELE = \frac{v^2}{R} \tag{2.1}$$

donde v es la velocidad del vehículo, y R es el radio de la curva.

Luo (2005) nombra a esta característica *steady-turning rollover threshold*, y la describe como la inmunidad de un vehículo pesado para sufrir una volcadura durante una vuelta en estado permanente, definiéndola también como la aceleración lateral máxima que la unidad puede resistir antes de acercarse a su condición de volcadura relativa, la cual se caracteriza por la pérdida del contacto con el pavimento de todas las llantas de un costado del camión, a excepción del eje direccional.

Se indica que un valor mínimo sugerido para esta característica de desempeño es de 0.35. Se describe una situación para medirla, consistente en someter al vehículo bajo prueba a una maniobra de vuelta a alta velocidad en estado permanente. Esta maniobra se lleva a cabo al circular el camión a una velocidad constante de 100 km/h, al tiempo que el ángulo del volante se incrementa a una taza pequeña (2 g/s) hasta alcanzar la condición de volcadura relativa. En ese momento se toma el valor de la aceleración lateral de la masa suspendida del vehículo, estableciéndola como el umbral de volcadura en vuelta en estado permanente.

Coleman y Sweatman (2002) reconocen esta característica como *static roll stability*, o estabilidad de balanceo estática. Se indica que en el caso de combinaciones vehiculares, el límite de estabilidad al balanceo es una propiedad crítica, describiéndola como la aceleración lateral requerida para producir una volcadura total de la unidad trasera, normalizando dicha aceleración en términos de la aceleración de la gravedad (*g*). La volcadura total ocurre entonces cuando todas las llantas de un lado de la combinación vehicular se despegan del pavimento, como se muestra en la fig 2.8, al alcanzarse una aceleración lateral igual o mayor al límite de volcadura del automotor. Finalmente, se indica que dicha aceleración es altamente sensible a la velocidad, y que la velocidad requerida para producir la volcadura se reduce en tanto el radio de la curva disminuye, y se incrementa en tanto se aumenta el peralte del camino.

Para Billing (2003), la estabilidad lateral estática se define en términos del *Static rollover threshold*, como la aceleración lateral, expresada en términos de la aceleración de la gravedad, a la cual el vehículo vuelca durante una maniobra a velocidad constante. Se señala que esta medida correlaciona bien con la incidencia de los accidentes tipo volcadura en la que sólo el camión volcado se ve involucrado. Se señala que este umbral debería no ser menor de 0.4 g.

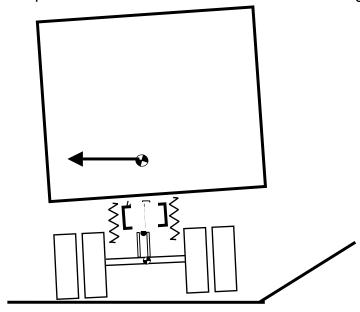


Figura 2.8. Tendencia a la volcadura (Coleman y Sweatman, 2002)

#### Cociente de transferencia lateral de carga (CTLC)

La realización de maniobras direccionales provoca alteraciones en los valores de las cargas que las ruedas ejercen sobre el pavimento en uno de los extremos de los ejes, lo que se denomina transferencia lateral de carga. La magnitud de esta

transferencia proporciona una medida de la tendencia a la volcadura, y se mide en términos de un cociente de transferencia lateral de carga, de la siguiente manera (El-Gindy, 1995):

$$CTLC = \left| \frac{F_{zi} - F_{zd}}{F_z} \right| \tag{2.2}$$

donde  $F_{zi}$  es la suma de todas las fuerzas en las llantas del lado izquierdo;  $F_{zd}$  la suma de todas las fuerzas de los neumáticos del lado derecho; y  $F_z$  la suma de todas las cargas de las llantas sobre el pavimento. Esta ecuación muestra que el valor del CTLC se aproxima a la unidad cuando todas las fuerzas sobre el pavimento se concentran en uno de los extremos de los ejes, ya sea el izquierdo o el derecho, señalando que el otro extremo ha perdido contacto con la superficie del camino y que una volcadura es inminente. En la literatura se recomienda un valor máximo para este CLTC de 0.6 (El-Gindy, 1995).

Jujnovich y Cebon definen el *load transfer ratio* como el valor absoluto del cociente de la resta de las fuerzas a ambos lados del vehículo, entre la suma de las fuerzas a ambos lados del mismo.

Luo define el *dynamic load transfer ratio* reconociendo, que si bien el umbral de volcadura estático es un antecedente importante en la tendencia a la volcadura de vehículos, no es representativo de la potencial volcadura de los camiones al circular a altas velocidades y realizar maniobras direccionales. Sin embargo, señala que la inmunidad de las unidades para volcarse puede relacionarse de manera directa con la transferencia de carga de las llantas interiores hacia las exteriores. Por tanto, dicho cociente representa una herramienta efectiva para evaluar la estabilidad dinámica del camión, definiéndolo de la misma manera que la ec 2.2. Se establece que este parámetro de transferencia de carga se evalúa, bajo una maniobra de cambio de trayectoria a alta velocidad (100 km/h), que es la misma maniobra que se aplica para evaluar otra medida de desempeño, la amplificación de la zaga.

Coleman y Sweatman (2002) definen al cociente de transferencia de carga (*load transfer ratio*), como la proporción de la carga de un lado de la unidad vehicular que es transferida al otro lado durante una maniobra transitoria. Se indica que para el caso de las combinaciones del tipo trenes B, en las que las unidades están acopladas en balanceo (*roll*), el cociente de transferencia de carga se calcula para todos los ejes acoplados en balanceo. Se indica que cuando el valor de esta característica alcanza el valor 1, la volcadura está próxima a ocurrir.

Se reconoce esta medida de desempeño como la medida última de la estabilidad respecto a la volcadura, misma que es empleada por los autores para evaluar el desempeño dinámico de un conjunto de vehículos al realizar una maniobra de cambio de carril (figura 2.4), efectuada a una velocidad de 90 km/h. Se hace

referencia a una norma SAE (SAE J2179: A Test for Evaluating the Rearward Amplificiation of Multi-Articulated Vehicles).

Para Billing (2003), el cociente de transferencia de carga es el cambio fraccional de carga entre los lados izquierdo y derecho del vehículo durante una maniobra evasiva. Se señala que esta medida indica qué tanto se acercó el vehículo a levantar todas las llantas de un lado, como una condición precursora de una volcadura. Como en el caso de Luo, se indica que este cociente no debería exceder 0.6, señalando que ello es equivalente a una división de las cargas sobre los costados izq-der de 80-20%.

Estas aproximaciones a la transferencia lateral de carga establecen el mismo concepto, y los valores que pueden tomar son de 0 a 1; 0 representa una condición de equilibrio, y 1 significa que todo el peso del vehículo se concentró en un extremo de los ejes.

#### Amplificación de la zaga (AZ), o factor de amplificación de la zaga (FAZ)

Luo (2005) señala que en el caso de combinaciones vehiculares, la respuesta a alteraciones direccionales rápidas es mayor en los últimos cuerpos vehiculares respecto a aquella de los cuerpos del frente, estando representada por aceleraciones y desplazamientos de mayor magnitud en tales unidades traseras. Esta característica puede evaluarse a través del cociente de amplificación de la zaga, el cual se define como el cociente de la aceleración lateral pico del último remolque entre aquella del tractor.

Se señala que un grado mayor de amplificación implica una probabilidad más alta de volcadura del remolque, y se sugiere que tal cociente de amplificación de la zaga no debería exceder un valor de 2.2. Se apunta que esta estimación se obtuvo de maniobras estandarizadas de cambio de trayectoria llevadas a cabo a 100 km/h, implicando una amplitud de aceleración lateral de 0.15 g en el centro del eje delantero del tractor, por un periodo de 3 s.

Raj (1998) asume esta característica como factor de amplificación de la zaga, reconociéndola como una medida dependiente de la frecuencia de un cambio brusco, que establece la relación entre el comportamiento de la unidad última y aquella del tractor. En este caso, los factores de amplificación se obtienen en términos del ángulo de balanceo y de velocidad de balanceo del tractor y del remolque, en una maniobra simple de cambio de carril.

Jujnovich y Cebon (2002) definen lo que denominan amplificación de la zaga (*rearward amplification*) como el valor máximo de esta característica, en términos del cociente de la aceleración lateral del eje posterior del remolque entre aquella del eje delantero del tractor.

Coleman y Sweatman (2002) señalan que cuando los vehículos multiarticulados sufren un cambio direccional rápido, el efecto de giro se magnifica en el remolque, provocando un aumento en las fuerzas o aceleraciones laterales que actúan en el último módulo. Esto a su vez incrementa la posibilidad de que el remolque último vuelque, bajo ciertas circunstancias. Definen la amplificación de la zaga como el cociente de la aceleración lateral en el centro de gravedad de la última unidad, entre aquella aceleración del punto correspondiente del módulo de arrastre al llevar a cabo una maniobra dinámica a una frecuencia dada.

Se indica que la oscilación direccional produce mayor movimiento en la unidad posterior que en la de arrastre, como se ilustra en la figura 2.9. Se afirma entonces, que la amplificación de la zaga expresa la tendencia de una combinación vehicular a desarrollar aceleraciones laterales más altas en las unidades traseras, en la realización de maniobras evasivas. De esta manera, esta amplificación expresa la cantidad de espacio adicional del camino que es usado por el vehículo durante una maniobra evasiva.

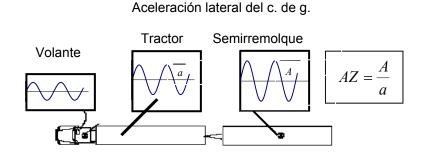


Fig 2.9. Amplificación de la zaga de la aceleración lateral

#### Amortiguamiento de la oscilación direccional (AOD)

El amortiguamiento de la oscilación direccional (yaw) se establece como otra medida de desempeño. Coleman y Sweatman (2002) la definen como la rapidez a la cual se amortiguan las oscilaciones direccionales del último remolque después de una perturbación direccional de corta duración, aplicada a la unidad de arrastre. De acuerdo con esos autores, para evaluar este desempeño se considera inicialmente un recorrido en línea recta a 100 km/h, para aplicarle posteriormente un pulso de perturbación direccional, como se define en una referencia para evaluar el desempeño de dollies (Winkler, 1986). La medición de

los movimientos de los diferentes cuerpos vehiculares se emplea para calcular el amortiguamiento de las oscilaciones direccionales de cada vehículo.

Billing (2002) emplea el *coeficiente* de amortiguamiento de oscilación direccional, considerándolo como la rapidez de decaimiento de la oscilación del remolque después de una perturbación direccional armónica. Se dice que es una respuesta importante en el caso de combinaciones vehiculares de dos o más unidades, pero que no es significativo en el caso de combinaciones tractor-semirremolque.

Esta propiedad de respuesta de las combinaciones vehiculares, no es empleada por Jujnovich y Cebon (2002), ni por Luo (2005) en sus respectivos estudios sobre ejes virables.

#### Demanda de fricción de la llanta virable

La medida de desempeño, *steer tyre friction demand*, es empleada por Jujnovich y Cebon (2002), describiéndola como el coeficiente de fricción necesario para evitar el deslizamiento de las ruedas delanteras, expresada en porcentaje:

$$F_{vl} / (F_{zl} \cdot \mu_{pico}) \times 100$$
 (2.3)

donde  $F_{zl}$  y  $F_{yl}$  son la fuerza vertical y horizontal en la llanta respectivamente, y  $\mu_{pico}$  el coeficiente de fricción necesario para evitar que se deslice la rueda direccional. La evaluación de esta respuesta característica se considera en una maniobra a baja velocidad (10 km/h) en la que el centro del eje virable sigue una trayectoria que parte de la línea recta, y toma una curva de 11.25 m de radio y 90° de extensión.

#### Demanda de fricción

Luo (2005) describe ampliamente esta característica de desempeño, indicando que la falta de fricción llanta-pavimento en los ejes de combinaciones vehiculares, puede provocar el fenómeno conocido como acodillamiento (*jacknifing*), especialmente en el caso de pavimentos que exhiban baja fricción. La define como la fricción mínima requerida para que una combinación vehicular logre una vuelta sin sufrir la pérdida de control. Se considera la medición de esta propiedad tanto a baja como a alta velocidad. Para baja velocidad se considera una maniobra en vuelta cerrada, mientras que para la alta se incluye cambio de carril. Esta demanda de fricción se expresa de la siguiente manera:

$$FD = \frac{\sum F_y}{\sum F_z \cos \Gamma}$$
 (2.4)

donde  $\sum F_y$  es la suma de las fuerzas direccionales del eje motriz;  $\sum F_z$  la suma de las cargas verticales de las llantas del eje motriz, y  $\Gamma$  el ángulo de la articulación entre el tractor y el remolque. Un valor más elevado para este FD

indica una tendencia mayor para la ocurrencia del acodillamiento, con lo que el vehículo tenderá entonces a perder control en superficies resbalosas.

Las condiciones para esta prueba son una vuelta de 90° a una velocidad de 8.8 km/h, recorriendo la parte central del eje virable del tractor una curva de 14 m de radio. La prueba de demanda a alta velocidad se evalúa a 100 km/h, en la que la demanda de fricción se espera mayor.

Para Coleman y Sweatman (2002), la demanda de fricción no es un factor relevante en el estudio del comportamiento direccional de las combinaciones vehiculares.

Billing (2003) la describe como la necesidad de contar con fuerzas laterales en los ejes motrices para poder efectuar vueltas cerradas; a la vez que plantea al acodillamiento como el efecto de no contar con la fricción demandada. Se señala que la demanda de fricción debería ser menor de 0.1. La máxima fricción necesaria debe poder ser provista por la interfaz llanta-pavimento. Se indica que si la demanda alcanza el valor de 1, se tendría el caso límite en el que el tractor se desviará de la vuelta. Aclara que la utilización de la fricción no debería ser mayor de 0.8, y que esta medida de desempeño es particularmente significativa en los ejes tridem motrices.

#### Ángulo máximo de los ejes autovirables

En el caso particular de ejes direccionables empleados en las combinaciones vehiculares, se ha desarrollado una medida específica de desempeño consistente en el máximo ángulo necesario para que el eje autovirable efectúe una vuelta a baja velocidad en una intersección. De acuerdo con Billing, el máximo ángulo de ejes direccionales no debería exceder el máximo barrido de llanta (*wheel cut*) provisto por el eje autovirable. El Ministerio del Transporte de Ontario (regulación 597) requiere un barrido de llanta de 20°, provisto por el eje autovirable equipado a un semirremolque que combine ese eje con un tridem o en cuádruple.

#### Diagrama de manejo

Se emplea por algunos autores para evaluar la tendencia de un vehículo a sufrir sobreviraje, y por tanto volverse inestable.

Raj (1998) indica que el diagrama de manejo provee información importante relacionada con las características de estabilidad y control de los vehículos en un amplio rango de aceleraciones laterales. En el caso de la respuesta de manejo en estado permanente de una combinación tractor-semirremolque, los diagramas de manejo se derivan a partir de un modelo de oscilación direccional simple. Las ecuaciones respectivas para el estado permanente de giro de una combinación vehicular tractor-semirremolque, se expresan de la siguiente manera:

$$K_{ust}a_1 = -\left(\frac{L_1r_1}{U} - \delta\right) \qquad K_{uss}a_2 = -\left(\frac{L_2r_2}{U} - \gamma\right)$$
 (2.5)

en donde  $\delta$  es el ángulo del eje dirección del eje delantero y  $\gamma$  el ángulo de la articulación.  $L_1$  y  $L_2$  son las distancias entre ejes del tractor y semirremolque,

respectivamente; U la velocidad de avance del vehículo;  $a_1 = \frac{U^2}{R_1}$  y  $a_2 = \frac{U^2}{R_2}$  las

aceleraciones debidas al cambio direccional sobre ambos cuerpos vehiculares, respectivamente;  $K_{\it uss}$  y  $K_{\it uss}$  los coeficientes de subviraje para ambas unidades, cuya magnitud y signo representan de manera directa las características de manejo del vehículo.

Al respecto, se indica que puede demostrarse que un vehículo con subviraje ( $K_{ust} > 0$  y  $K_{uss} > 0$ ) es incondicionalmente estable; un tractor sobrevirado ( $K_{ust} < 0$ ) puede ocasionar una inestabilidad direccional; mientras que un semirremolque sobrevirado  $K_{uss} < 0$ , puede provocar dificultades para dar vuelta.

Los diagramas de manejo del tractor y semirremolque consisten en la graficación de la aceleración lateral versus los parámetros de manejo  $\left(\frac{L_1r_1}{U}-\delta\right)$  o  $\left(\frac{L_2r_2}{U}-\gamma\right)$ , para estados permanente y transitorio.

La pendiente de la curva de manejo se relaciona con el coeficiente de subviraje, de la siguiente manera:

$$\frac{d(a_1)}{d\left(\frac{L_1 r_1}{U} - \delta\right)} = -\frac{1}{K_{us}}$$
(2.6)

Esto es, la pendiente del diagrama de manejo representa la condición de estabilidad o inestabilidad del vehículo.

La fig 2.10 ilustra un diagrama de manejo de un tractor durante una maniobra en espiral a 100 km/h, en la que la posición del volante se alteró a razón de 2 g/s para una aceleración lateral,  $a_y$ . Se señalan en la figura las características de estabilidad e inestabilidad del vehículo, como una función de la pendiente de la curva, mostrando que la inestabilidad por sobreviraje se presenta a una aceleración lateral de 0.16 g, y un parámetro de manejo  $\left(\frac{Lr}{U} - \delta\right)$  igual a 0.27.

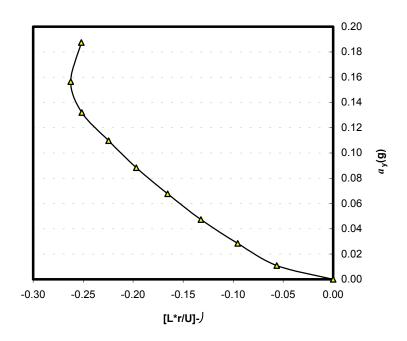


Figura 2.10.

Diagrama de manejo de un tractor de semirremolque (Romero et al, 2001)

Sin embargo, para Billing (2003) los diagramas de manejo no resultan tan significativos para evaluar el desempeño direccional de los vehículos, indicando que no queda claro cómo los valores obtenidos en el diagrama de manejo afectarán el desempeño de la unidad en la carretera. Se dice que en la mayoría de los casos, si el conductor se encuentra en una región en la que la manejabilidad se encuentra degradada, a tal grado que tenga dificultades para controlar el vehículo, entonces es muy probable que el conductor pierda el dominio de la unidad de cualquier manera.

En su estudio de la estabilidad de ejes direccionales, Lou (2005) tampoco hace uso de los diagramas de manejo en su análisis comparativo de ejes virables.

Coleman y Sweatman (2002) emplean los diagramas de manejo sólo de manera marginal, en particular para evaluar el comportamiento direccional comparativo de vehículos no articulados.

#### Calidad de manejo

Jujnovich y Cebon utilizan un gradiente del diagrama de manejo para establecer la calidad de manejo, identificando un valor crítico de la pendiente del diagrama, o valor crítico de  $K_{nsc}$ , en el que la pendiente pasa de negativa a positiva. En ese

diagrama identifican dos situaciones riesgosas: por un lado puede ocurrir la volcadura del vehículo; por el otro, que surja la inestabilidad lateral del mismo. Se señala que de manera preferente, un vehículo debería no volverse direccionalmente inestable antes de alcanzar su umbral de volcadura.

Se indica que una medida de la manejabilidad de los vehículos se encuentra bajo estudio, la que se refiere al método de los "tres puntos", que involucra observar la pendiente de la curva del diagrama de manejo en tres puntos críticos: a 0.15 g, en el punto de transición sub-sobre-virado y a 0.3 g de aceleración lateral. Aunque esto hace más simple el análisis, se reconoce que considerar el diagrama de manejo completo brinda una mejor visión del comportamiento de la unidad.

## 2.4 Medidas de desempeño del efecto en el pavimento

Ni Coleman y Sweatman (2002), ni Billing (2003) consideran en sus respectivos estudios el efecto potencial de los ejes virables en los pavimentos.

#### Fuerza direccional máxima

Jujnovich y Cebon (2003) consideran dos fuerzas máximas que pudieran estar relacionadas con el deterioro de los pavimentos. Se trata de sendas fuerzas direccionales máximas desarrolladas en las llantas de los ejes motrices y de los remirremolques al trasladarse el vehículo a 10 km/h en círculo, y en vuelta de 90°.

Ambas maniobras comprenden la aproximación del vehículo en línea recta y el seguimiento consecuente del eje direccional en una trayectoria circular de 11.25 m de radio. Por un lado se trata de un arco de 90°, y por el otro de una circunferencia completa.

#### Coeficiente de carga dinámica (CCD)

La variación de las fuerzas que las llantas ejercen sobre el pavimento representa una medida del efecto potencial de los vehículos en la carpeta. Tales variaciones se asocian a la respuesta dinámica vehicular al perfil del pavimento, que son una función de las condiciones de operación de los vehículos y de las características de los elementos que constituyen la suspensión y las llantas. Asimismo, de la condición del pavimento en cuanto al nivel de irregularidades que presente.

Lou (2005) señala que la componente dinámica de la fuerza de las llantas sobre el pavimento constituye una fuerza adicional respecto a la carga estática, la cual tiende a acelerar el estado de deterioro de las infraestructuras. El *CCD* se define como el cociente de la desviación estándar de las fuerzas en las llantas entre el promedio de tales fuerzas, esto es:

$$CCD_l = \frac{\sigma_l}{\overline{F}_l}$$
 (2.7)

donde  $\sigma_l$  es la desviación estándar de las fuerzas de las llantas de un eje dado, y  $\overline{F}_l$  el promedio de fuerzas de ese mismo eje, que es igual a la carga estática. Se señala que los valores típicos de *CCD* están en el rango de 0.05 a 0.3.

#### Carga de eje sencillo equivalente (CESE), y factor de carga equivalente (FCE)

Este es un concepto que se deriva de un experimento realizado en los 60's, del que se concluyó que el efecto de incrementar carga en los ejes guarda una relación de cuarta potencia con el efecto potencial sobre el pavimento. Luo (2005) propone la siguiente definición:

$$CESE_{eje} = \left(\frac{F_{zl}}{P_0}\right)^4 \tag{2.8}$$

donde  $P_{\rm 0}$  es la carga estándar de un eje sencillo de 80 kN, y  $F_{\rm zl}$  la carga real del eje.

Esta ley se emplea en el cálculo del número de ejes equivalente que corresponden a una carga de eje, diferente a los 80 kN. De esta manera, una carga de 112 kN representa 3.72 ejes equivalentes (112/80)<sup>4</sup>, e impondría un daño equivalente a 3.72 veces el daño potencial del eje estándar.

Adicionalmente, Luo propone una fórmula para tomar en cuenta grupos de cargas en los vehículos, denominándolo "factor de carga equivalente" (FCE) (load equivalent factor) de la unidad de que se trate, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FCE = \sum_{l=1}^{N_1} \left( \frac{F_{szl}}{80000} \right)^4 \tag{2.9}$$

donde  $N_1$  es el número total de ejes.

#### Factor de esfuerzo del camino (FEC)

En este concepto, el factor dinámico de la carga de la llanta se emplea para evaluar su efecto potencial sobre el pavimento, considerando lo siguiente (Luo, 2005):

- i. Que el deterioro del pavimento es función de la carga dinámica en cualquier punto de la superficie de la carpeta, elevada a la cuarta potencia
- ii. Que las fuerzas de llanta siguen una distribución normal, de tal suerte que la fuerza dinámica del neumático en cualquier punto sobre la superficie del camino, puede determinarse a partir de:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)}$$
 (2.10)

donde F(t) representa el valor de la fuerza dinámica probable en el rango de tiempo (t, t + dt);  $\mu$  el valor medio; y  $\sigma$  la desviación estándar

iii. Que el vehículo puede ejercer sus fuerzas pico en cualquier punto a lo largo del pavimento, ignorando por tanto la repetibilidad espacial

De acuerdo con Luo (2005), el factor de esfuerzo del camino fue introducido por Eisenmann en 1975, y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Phi = E[(F(t)^4] = (1 + 6\overline{s}^2 + 3\overline{s}^4)P_{stat}^4$$
 (2.11)

donde F(t) es la fuerza dinámica en un tiempo dado t;  $\overline{s}$  el coeficiente de variación de la fuerza dinámica de la carga;  $P_{\textit{stat}}$  la fuerza estática, que es la fuerza promedio; y el operador  $E[\ ]$  define la esperanza. En esta ecuación,  $\overline{s}$  puede hacerse igual al coeficiente de carga dinámica, de tal suerte que para el eje t, el factor de esfuerzo en el camino respectivo,  $\Phi_1$ , puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Phi_l = (1 + 6CCD_l^2 + 3CCD_l^4)F_{ezl}^4$$
 (2.12)

donde  $F_{ez1}$  es la fuerza estática de las llantas en el eje l, y  $\mathit{CCD}_l$  puede obtenerse de la ecuación 2.7.

#### Fuerza dinámica agregada (FDA)

De acuerdo con Luo (2005), este criterio de fuerza dinámica agregada se deriva de mediciones de campo efectuadas por Collop (1993), las cuales revelaron que las fuerzas pico vehiculares tienden a concentrarse en determinados puntos a lo largo del perfil del camino. Los experimentos demostraron que el 95 percentil de

las fuerzas agregadas proporciona el daño en el 5% de los puntos a lo largo del pavimento. De esta manera, para evaluar la distribución espacial del efecto de los vehículos en la carpeta, los autores optaron por obtener la suma de las fuerzas que ejercen a lo largo del pavimento los diferentes vehículos, aplicándoles estudios de correlación entre todas las historias de fuerzas, proponiendo la siguiente ecuación para los  $N_1$  ejes de una unidad:

$$FDA = \sum_{l=1}^{N_1} F_{zl}^{\ n}(t + t_{1l})$$
 (2.13)

donde  $F_{zl}(t)$  es la fuerza de las llantas del eje 1 sobre las roderas izquierda y derecha en el tiempo t;  $t_{1l}$  el retraso del tiempo entre el eje delantero y el eje 1. En esta ecuación, la potencia n se escoge con base en el criterio del tipo de deterioro del pavimento. Para el caso de la fatiga de los pavimentos flexibles, la potencia se elige de cuatro.

#### Esfuerzo dinámico agregado (*EDA*)

Esta medida de desempeño toma en cuenta que puede variar el área de contacto entre la llanta y el pavimento, como una función de la rugosidad de éste y de la vibración del vehículo. Se ha considerado que tomar en cuenta un área de contacto nominal pudiera mejorar los análisis. Para ello se ha definido el criterio de esfuerzo dinámico agregado (*EDA*), para evaluar el esfuerzo en el pavimento en un punto particular debido al esfuerzo de contacto nominal de la *n*-sima potencia, de la siguiente manera (Cebon, 1991):

$$DASC = \sum_{l=1}^{N_1} \left( \frac{F_{zl} (t + t_{1l})}{S_l} \right)^n$$
 (2.14)

donde  $S_l$  es el área de contacto nominal de las llantas de los ejes, que se derivan de la siguiente ecuación:

$$S_l = w_l [\sqrt{R_l^2 - (R_l - \Delta R_l)^2}]$$
 (2.15)

donde  $w_l$  es el ancho de las llantas del eje l;  $R_l$  el radio de la llanta y  $\Delta R_l$  la deflexión de la llanta del eje l.

Considerando diversas maniobras direccionales, con transportes de varios ejes direccionales, Luo (2005) ha empleado estas medidas de desempeño para evaluar vehículos que viajan a 100 km/h, sobre longitudes de pavimentos de 100 m como mínimo.

#### Energía de deformación del pavimento

Las medidas de desempeño descritas en cuanto al efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento, están enfocadas a la consideración exclusiva de las fuerzas que los vehículos desarrollan y ejercen sobre la carpeta. Esto es, que ninguna de esas medidas toma en cuenta la respuesta del pavimento a tales cargas.

Romero, et al (2000A, 2000B) han propuesto una medida de desempeño del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento, la cual toma en cuenta la respuesta de éste. La respuesta varía de acuerdo con las diferentes propiedades de la mezcla asfáltica, que incluyen su dependencia a la velocidad de aplicación de la carga. El modelo de interacción vehículo-pavimento se basa en un diseño de pavimento discretizado, compuesto de "tabiques" de material asfáltico, soportados por una sub-base infinitamente rígida, como se muestra en la figura 2.11. Las propiedades de estos elementos discretos de material asfáltico son una función de diferentes características de operación y de construcción del pavimento, empleando relaciones empíricas reportadas en la literatura (Collop, 1993). Tales características incluyen el contenido de huecos de la mezcla asfáltica, el índice de penetración del aglutinante asfáltico, la temperatura suavizante del aglutinante, y la temperatura de la mezcla.

La figura 2.11 es una representación esquemática del modelo de una carga en movimiento, que es ejercida por la llanta sobre el pavimento al viajar el vehículo a una velocidad  $\nu$ . Se considera una presión uniforme sobre los elementos del pavimento, además de que la forma de la huella del neumático tiene dimensiones que coinciden con la longitud y ancho de los elementos de pavimento. Adicionalmente, se considera que las llantas ejercen una fuerza sobre solo un bloque de pavimento a la vez.

El modelo asume un sistema de referencia en movimiento con el vehículo, de tal manera que para cada eje corresponde una energía almacenada en un momento determinado. Considerando un conjunto de elementos de pavimento que comprenden un segmento de camino dado, así como un conjunto de ejes de los diferentes vehículos que pasan sobre los elementos de pavimento, la energía almacenada en el k —ésimo elemento de pavimento,  $V_k$ , se puede expresar de la siguiente manera (Romero et al. 2000B):

$$V_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\sigma_{ijk})^2 \cdot E; \quad k = 1, 2, \dots$$
 (2.16)

donde  $\sigma_{ijk}$  es el esfuerzo ejercido sobre el elemento k del pavimento por el eje i del vehículo j; m el número total de ejes debidos al paso de n vehículos en el segmento de camino; E la rigidez de los elementos del pavimento, como una

función de sus propiedades y velocidad de aplicación de la carga (Romero *et al.*, 2000A).

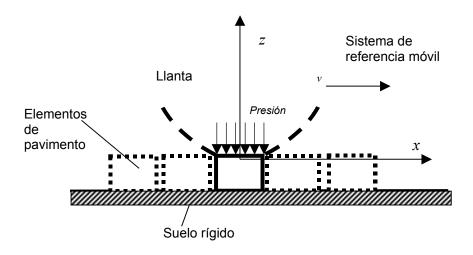


Fig 2.11.

Modelo físico del pavimento para el esquema de la energía de deformación

# 2.5 Eficiencia energética

Un aspecto importante para establecer las ventajas comparativas en el uso de ejes virables en las unidades remolcadas por los vehículos, reside en el ahorro de combustible asociado al uso de tales ejes, lo cual se deriva de la disminución del deslizamiento entre las llantas y el pavimento al aproximarse la trayectoria del eje direccional del tractor a aquellas de los ejes del semirremolque y/o remolque.

Sin embargo, el ensaye del desempeño energético de las combinaciones vehiculares con varios ejes virables tiene características especiales que dificultan la aplicación de normas tradicionales para determinar el desempeño energético de los vehículos.

Las normas vigentes se refieren a pruebas de dinamómetro de chasis, y algunas pruebas de campo. Al respecto se tienen la SAE J1376 y otra del tránsito en ciudades (*transit coach operating duty cycle*)(ETC, 2005).

Consiguientemente, para evaluar las ventajas energéticas potenciales de las combinaciones vehiculares equipadas con ejes virables, se requiere considerar metodologías alternas, que evalúen de manera objetiva la operación de tales equipamientos. Una particularidad extra de esta situación se desprende de que

bajo ciertas regulaciones, tales equipamientos direccionables, deben bloquearse una vez que los vehículos alcanzan cierta velocidad de operación. Consiguientemente, la medición de la ventaja energética, asociada al uso de ejes autovirables, se reduce a un ámbito limitado de operaciones y circunstancias de manejo.

Un esquema potencial para establecer de manera comparativa el efecto energético asociado al empleo de ejes autovirables en las combinaciones vehiculares, podría consistir en una maniobra en estado permanente, en círculo por ejemplo, por una cantidad tal de ciclos que permita caracterizar el consumo comparativo de combustible.

De manera inicial se requiere no obstante, elaborar modelos matemáticos que permitan predecir la mayor eficiencia energética que potencialmente se puede lograr mediante el uso de los ejes direccionales.

# 2.6 Desgaste de llantas

Los esfuerzos en la interfaz llanta-pavimento de los ejes virables y no virables, difieren entre sí en cuanto al "tallado" que se presenta al deslizarse sobre el pavimento en el caso de los ejes no virables. Esto es notable al observar la maniobra de vuelta de un vehículo articulado en un espacio estrecho, en donde se aprecia el "pintado" de hule en la carpeta.

La figura 2.12 muestra dos situaciones de cambio direccional del semirremolque, ilustrando la diferencia de contar o no con los ejes direccionales. En el caso hipotético de tener tres ejes autovirables, la parte a) de esta figura muestra cómo durante un cierto ángulo de oscilación del cuerpo vehicular, no habría momentos desarrollados en la interfaz llanta-pavimento, de acuerdo con la flexibilidad mostrada por los ejes autovirables. Por otro lado, en la parte b) se muestra cómo los momentos de equilibrio en las llantas, comienzan a desarrollarse en la interfaz llanta-pavimento desde el inicio del giro del semirremolque.

# 2.7 Otras medidas de desempeño

Una evaluación global del desempeño de los equipamientos deberá incluir la mayor cantidad de situaciones que se pueden presentar durante la operación normal y de emergencia de tales unidades.

El desempeño por cuanto a la eficiencia del frenado resulta básico para establecer las ventajas comparativas de las diferentes configuraciones vehiculares.

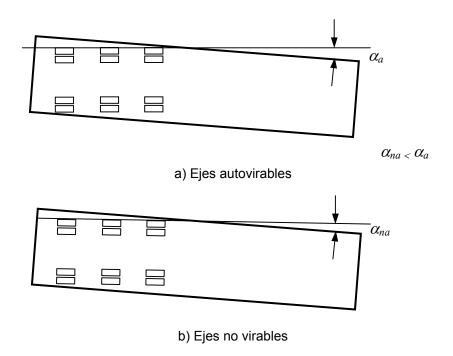


Figura 2.12. Efecto de la virabilidad de los ejes sobre los momentos en las llantas

La eficiencia del frenado, sin embargo, se ha establecido con base en el frenado sin deslizamiento vehicular. Esto es, empleando sistemas de frenado antibloqueo.

La eficiencia de frenado se asocia de manera directa con la cantidad de fuerza de frenado o fricción disponible en cada una de las ruedas durante el frenado. Un eje autovirable equipado con sistema de frenos antibloqueo no representaría mayores diferencias en cuanto al paro brusco del vehículo en línea recta.

Sin embargo, el desempeño de los ejes virables podría representar una situación diferente en el momento de un frenado en curva, debido a la transferencia lateral de carga durante una maniobra direccional, y a la operación del eje direccional como una función de las fuerzas laterales desarrolladas, que a su vez dependen de las fuerzas verticales.

Las referencias bibliográficas en cuanto a la evaluación dinámica de unidades equipadas con remolques con ejes direccionales, han asumido en general que la previsión de equipar a tales unidades con sistemas de frenos antibloqueo, es por sí misma suficiente para asegurar el desempeño de estas unidades. No obstante, se ha reconocido también la necesidad de desarrollar modelos validados acerca

de la respuesta dinámica de los camiones equipados con ejes autovirables durante maniobras combinadas de dirección y frenado (Luo, 2005).

De particular interés resulta estudiar el desempeño de los ejes autovirables en unidades que transporten materiales peligrosos, concretamente líquidos que tiendan a oscilar en el interior de sus contenedores, por representar un desplazamiento lateral de carga adicional que puede afectar significativamente el desempeño de los ejes autovirables.

En general, las medidas de desempeño para evaluar la operación de los vehículos en maniobras combinadas de frenado y de cambio de dirección, se basan en medir la transferencia longitudinal y lateral de carga, y en la capacidad del sistema de frenos para evitar el bloqueo de las ruedas, pues en una curva puede desencadenar el patinaje lateral del vehículo.

La norma ISO 14794:2003 *Heavy commercial vehicles and buses -- Braking in a turn -- Open-loop test methods*, establece los métodos para determinar el efecto sobre la manejabilidad del vehículo al usar el freno de servicio.

Esta evaluación requiere múltiples instrumentos y sensores, tales como los siguientes:

- Quinta rueda con encoder de 45 pulsos por pie
- Encoder de cuerda para medir la deflexión de la suspensión
- Sensor ultrasónico para medir la deflexión de la llanta
- Sensor de esfuerzo en el volante
- Posición del acelerador
- Esfuerzo en el pedal del freno, medido a través de celdas de carga
- Velocidad de la oscilación direccional
- Aceleración de la oscilación direccional
- Aceleración lineal
- Sistema de referencia inercial para la medición de los ángulos de cabeceo y balanceo; aceleraciones en x, y y z, de cabeceo, balanceo y de oscilación direccional
- Ángulo de balanceo a través de un giroscopio
- Anemómetro para la medición de la velocidad del viento

# 2.8 Discusión

La consideración de ejes direccionables en semirremolques y remolques tiene efectos en cuanto a las fuerzas tangenciales desarrolladas entre la llanta y el pavimento. Asimismo, en lo referente a las diferentes trayectorias que siguen las llantas de los vehículos.

Las medidas de desempeño descritas tienen que ver con las fuerzas tangenciales y verticales desarrolladas entre la llanta y el pavimento, así como con las diferentes trayectorias de los neumáticos de los vehículos. La diferencia entre las trayectorias de los ejes delanteros y traseros de las combinaciones, es menor en el caso de los ejes direccionables, de tal suerte que las cargas sobre la carpeta tienden a concentrarse en una franja de pavimento con un ancho menor. Esta riesgosa situación no es considerada en las diferentes medidas de desempeño acerca del efecto de los vehículos en el pavimento.

Se requiere entonces, considerar un pavimento discretizado en toda la superficie de recorrido de los vehículos, y evaluar la distribución espacial de las cargas sobre el pavimento, como una función del tipo de eje direccional considerado. Esto se ilustra en la fig 2.13.

Por otro lado, respecto al modelo de deterioro del pavimento basado en la energía de deformación almacenada en el pavimento al paso de los camiones, es posible idear la incorporación en ese modelo de los esfuerzos tangenciales entre la llanta y el pavimento, como se muestra en la fig 2.14. De esta forma, las alteraciones del elemento pavimento habrían de considerar, tanto las deformaciones normales como las de distorsión, o tangenciales.

Este modelo integral del efecto de las cargas verticales y tangenciales sobre el pavimento, incluyendo su distribución espacial en términos de respuesta de la carpeta, vendría a enriquecer las medidas de desempeño relacionadas con el efecto de los vehículos sobre el pavimento, dando una cantidad mayor de elementos de juicio para analizar comparativamente el desempeño de los ejes direccionales en las unidades de las combinaciones vehiculares.

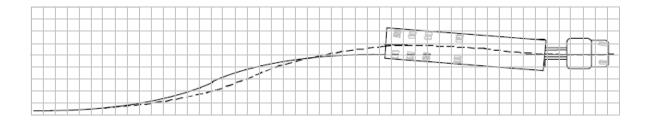


Fig 2.13. Modelo espacial del pavimento

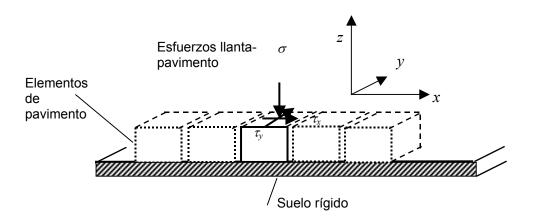


Fig 2.14.

Modelo de pavimento para tomar en cuenta las cargas verticales y tangenciales de las llantas

Asimismo, se requiere definir medidas de desempeño que tomen en cuenta de manera global el comportamiento vehicular, que incorporen tanto el desempeño geométrico como la tendencia a la volcadura y la inestabilidad direccional, así como su efecto potencial sobre el pavimento.

# 3 Tecnologías

Se presenta una revisión de las tecnologías comerciales de construcción de los ejes virables en combinaciones vehiculares, incluyendo una descripción de los sistemas de dirección en general.

### 3.1 Sistemas de dirección

De acuerdo con Billing (2003), existen tres tipos de sistemas de dirección:

- Dirección comandada
- Dirección forzada o articulada
- Autodirección

#### <u>Dirección comandada</u>

Para facilitar la descripción del sistema es conveniente señalar que el eje delantero de la mayoría de vehículos usa un proceso de dirección del tipo comandado.

En este sistema, el conductor gira la dirección, generando con ello una especie de orden para que el mecanismo de movimiento respectivo, oriente las ruedas del eje en forma proporcional al giro dado al volante. Esta orden o comando se transfiere por lo general mediante un eslabonamiento mecánico o sistema hidráulico, que se encarga de dar la orientación deseada de las ruedas. El comando controla el ángulo de dirección entre las ruedas y el eje longitudinal del vehículo, lo cual crea una fuerza que mueve al transporte hacia la dirección deseada de desplazamiento.

#### <u>Dirección forzada</u>

Este sistema usa por lo común un mecanismo para orientar al eje, o *boggie* del semirremolque o remolque, en proporción directa al ángulo de la articulación entre el vehículo de arrastre o tractor, y la unidad a la cual está sujeta el eje, o *boggie*.

De esta manera, el ángulo de la articulación y el mecanismo respectivo, controlan la orientación de las ruedas de la unidad arrastrada, y ayudan a ésta en la maniobra direccional.

Es importante notar que la orientación de las ruedas en un sistema de dirección forzada permanece constante durante una vuelta en estado permanente, en donde las ruedas generan las fuerzas laterales que pueden contribuir a darle estabilidad lateral/direccional al vehículo.

#### Eje autovirable

Un eje autovirable cambia de orientación, únicamente en respuesta a las fuerzas laterales que se desarrollan entre las llantas y el camino, no existiendo acoplamiento alguno con el vehículo, y careciendo en general de cualquier forma de control.

Requiere una combinación de arrastre, rigidez y de amortiguamiento para seguir fielmente la trayectoria deseada; esto es, sin deslizamientos o corrimientos.

El arrastre (*trail*) es la distancia longitudinal entre el eje de rotación del sistema de la dirección y el centro del área de contacto de la llanta; se compone del arrastre mecánico y del arrastre neumático.

El arrastre mecánico es la distancia física longitudinal entre el eje de giro de la dirección y el centro del árbol del eje; en tanto que el arrastre neumático es la distancia del centro del área de contacto de la llanta y el centro del árbol del eje. El arrastre neumático es función de la velocidad de avance del vehículo.

Con objeto de disminuir los efectos negativos del desbalanceo potencial de las fuerzas de frenado de las ruedas a ambos extremos del eje, los ejes autovirables cuentan por lo común con un dispositivo o sistema que proporciona una fuerza restauradora para regresar el eje a la posición central.

Antes de orientarse conforme a la dirección del vehículo, las fuerzas laterales en los neumáticos de los ejes autovirables deben vencer la fricción llanta-pavimento, y posteriormente también dominar la resistencia del sistema de autocentrado.

La fricción y la rigidez en el sistema de dirección, e incluso el amortiguamiento provisto en algunos sistemas, contribuyen de la misma manera a darle estabilidad al sistema autovirable. Las llantas en este eje no poseen control alguno y se orientan libremente, siguiendo la dirección de desplazamiento del remolque, como una función de las resistencias internas del sistema de autodirección.

Al respecto, se reconoce que un problema con estos ejes autovirables es que la fuerza lateral desarrollada en ellos puede llegar a ser tan pequeña, que la contribución de estos ejes a la estabilidad lateral-direccional del vehículo se ve limitada a la resistencia que el mecanismo de autocentrado pueda presentar.

En caso de que las ruedas a ambos extremos de un eje estén montadas de manera individual; o sea cada una con su perno rey, se debe emplear un mecanismo rótula-biela (*tie rod*) para asegurar la coordinación de la orientación de las ruedas en ambos extremos, proveyendo así la geometría direccional requerida.

De acuerdo con la reglamentación de Ontario, la definición legal de un eje autovirable incluye lo siguiente (Billing, 2003):

"... en el que las ruedas pueden articularse en respuesta a las fuerzas generadas entre las llantas y el camino, o a través de mecanismos que operen de manera independiente al operador de la unidad.."

# 3.2 Tecnologías para ejes autovirables

Otra vez, y conforme con Billing (2003), son tres los tipos de ejes de autodirección más importantes:

- Perno rey adelantado
- Perno rey alineado
- Tornamesa

#### Eje autovirable con perno rey adelantado

El eje autovirable con perno rey adelantado tiene un perno rey cuya orientación nominal es la vertical, el cual se coloca normalmente entre 0.15 y 0.2 m por delante del árbol del eje, como se muestra en la figura 3.1. Esta figura sólo representa el arreglo general del sistema, y no entra en detalles acerca del mecanismo de autocentrado, las partes de la suspensión ni de los candados para el bloqueo del eje.

El arrastre mecánico en este tipo de eje, es por lo común suficiente para dar estabilidad al mecanismo; es decir, para que no presente corrimientos o desviaciones riesgosas en la trayectoria.

Sin embargo, el perno rey puede desviarse de la orientación vertical como resultado de:

- 1. Cambios en la altura de trabajo del eje autovirable
- 2. Cambios en el ángulo de la plataforma del semirremolque, los cuales se presentan al usarse estos ejes en tractores con diferentes alturas de la quinta rueda
- Deflexiones de los diversos componentes por efecto de la carga, que incluyen las suspensiones del tractor y semirremolque, así como los respectivos bastidores

Se reconoce, no obstante, que emplear suspensiones de aire tanto en el tractor como en la unidad arrastrada, reduce considerablemente la variación de la altura de la suspensión por efecto de la carga, de tal suerte que los ejes autovirables pueden montarse en una suspensión de aire que cuente con un brazo de arrastre.

#### Eje autodireccionable con perno de rey alineado

Este eje autovirable posee un perno rey inclinado, el cual se encuentra en línea con el árbol del eje, como se muestra en la figura 3.2. Al igual que en el caso de la figura 3.1, con objeto de darle claridad a la representación gráfica en dicha figura, no se incluyen en ella detalles relativos a la suspensión y seguros de giro. Este eje es en esencia similar al direccional delantero de un camión no articulado de dos ejes, distinguiéndose únicamente por emplear un ángulo de inclinación mayor con objeto de incrementar el arrastre, y asegurar la estabilidad direccional dinámica.

La estabilidad en este tipo de eje depende de manera crítica del ángulo de inclinación del perno rey, el cual puede variar por los efectos descritos anteriormente.

De esta manera, una suspensión de aire con un brazo de arrastre simple, no siempre proporciona el suficiente control en la inclinación del perno rey para asegurar una estabilidad direccional. Como resultado de esta situación, el eje autovirable se instala por lo común con un mecanismo de brazo paralelo, que va fijo al ángulo de inclinación de este tipo de perno con relación al bastidor del vehículo, como se muestra en la figura 3.2.

#### Eje autodireccionable tipo tornamesa

El eje autovirable, de tipo tornamesa o pivotado, consiste simplemente en montar un eje rígido por debajo de un tornamesa automotriz, como se muestra en la figura 3.3.

El eje se coloca por lo común entre 0.3 y 0.38 m por detrás del centro de la tornamesa, con objeto de proveer el arrastre mecánico necesario para darle estabilidad dinámica al desplazamiento. Este tipo de tornamesa se ha empleado en algunos dollies o patines del tipo C.

Sin embargo, no es práctico para semirremolques del tipo plataforma, ya que el espesor del tornamesa ocupará parte del espacio requerido para darle la carrera a la suspensión. Por ello, el uso de estos ejes es viable en semirremolques tipo caja (*van*).

La distancia que va desde del centro de la rueda al centro de giro de la tornamesa, es considerablemente mayor que la distancia del perno rey a los

centros de las llantas de los ejes autovirables con perno rey adelantado. Esta condición tiene el efecto de exagerar la acción direccional en situaciones, en las que se presenta un desbalanceo de las fuerzas de frenado en los neumáticos izquierdos y derechos de los ejes.

#### Arreglos de llantas duales, y mecanismo de retorno al centro

Cualquiera de los tres ejes autovirables descritos, puede emplearse con llantas sencillas o duales, e incorporar mecanismos de autocentrado del eje, o estar equipados con dispositivos para incrementar la estabilidad direccional dinámica.

Asimismo, pueden estar provistos con seguros para inmovilizarlos bajo ciertas condiciones de operación (en reversa o a velocidades elevadas)

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran dos modelos comerciales de eje autovirable, que incorporan características especiales. Mientras que ambos son retráctiles, el de la figura 3.5 incorpora un mecanismo de autocentrado; y el de la figura 3.4, amortiguadores.

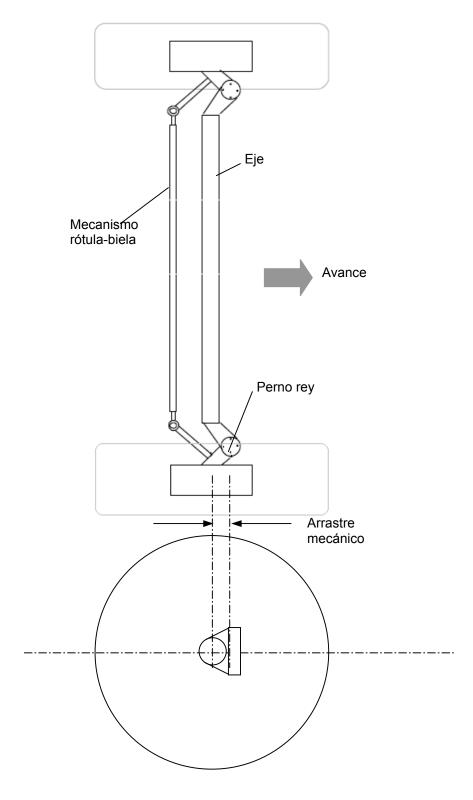


Figura 3.1. Eje autovirable con perno rey adelantado

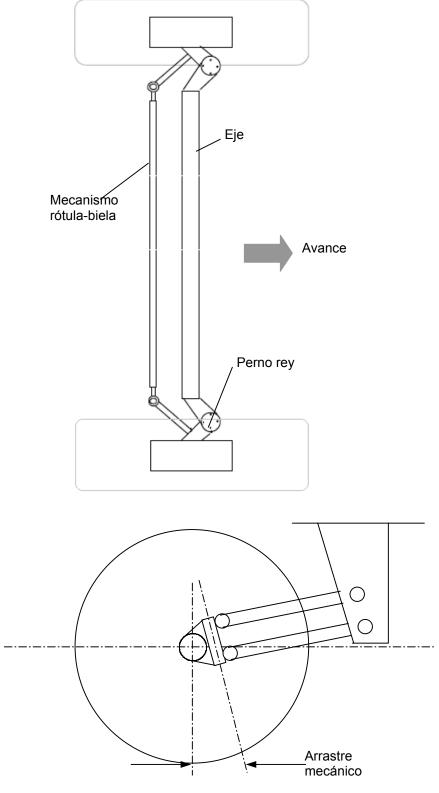


Figura 3.2. Eje autovirable con perno rey alineado

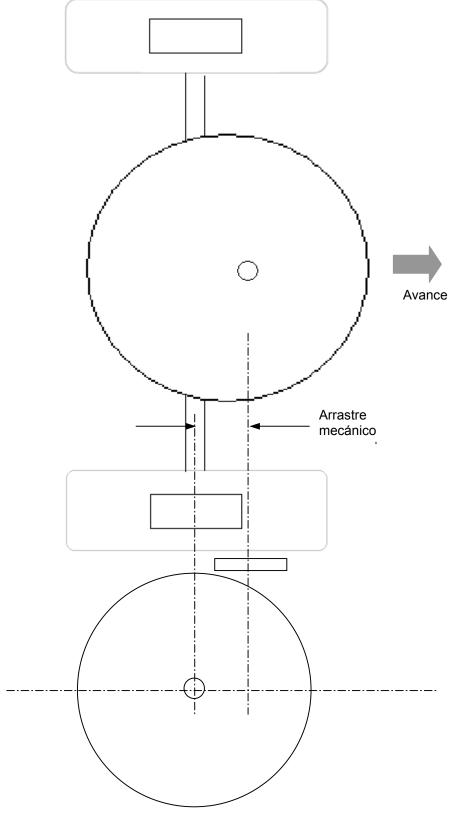


Figura 3.3. Eje autovirable tipo tornamesa

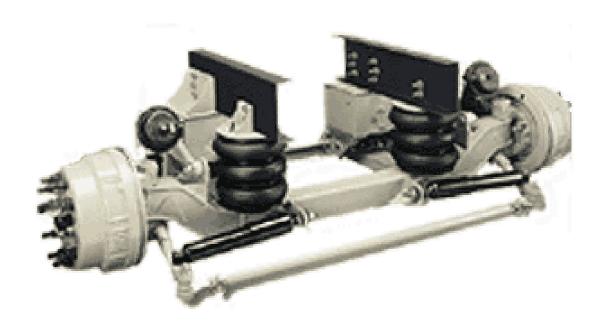


Figura 3.4. Eje autovirable tipo paralelogramo, retráctil con elevación automática en reversa

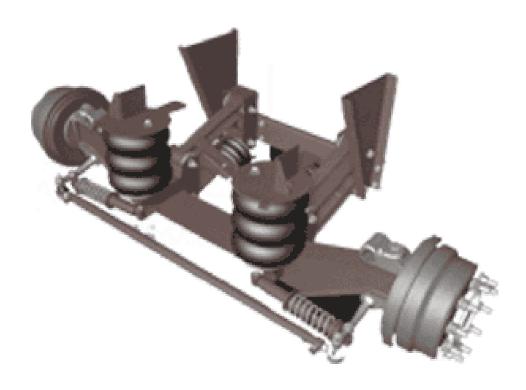


Figura 3.5.
Eje autovirable tipo paralelogramo, retráctil con elevación automática en reversa y con equipo de autocentrado

## 4 Revisión de la literatura

Los contenidos de distintas referencias bibliográficas se han agrupado en dos partes: metodologías y enfoques, y resultados.

# 4.1 Metodologías y enfoques

Se presentan tres grupos de informes en los cuales se han abordado recientemente temas relacionados con el uso de ejes direccionales en las unidades remolcadas de combinaciones vehiculares. Tales trabajos se llevaron a cabo en Australia, Asia, Canadá e Inglaterra. Los enfoques tienen diversos alcances y metodologías, que van desde los aspectos académicos hasta los estudios de diseños alternos y aspectos normativos.

## 4.1.1 Estudios en Australia y Asia

Coleman y Sweatman (2002), estudiaron las ventajas potenciales de emplear arreglos direccionales en los ejes, con objeto de "mejorar la movilidad de los vehículos al tiempo de incrementar la productividad de los transportistas". De acuerdo con esto, su enfoque es tanto técnico como normativo.

En este contexto, tales autores encuentran razones para analizar el uso de más de un eje virable en los transportes combinados. Para ello se plantean las consecuencias negativas de incorporar ejes no direccionales en las combinaciones vehiculares, a saber:

- Desgaste incrementado de las llantas
- Despiste incrementado
- Deterioro mayor del pavimento
- Mayor resistencia al desplazamiento hacia delante del vehículo
- Efectos negativos sobre el control direccional del vehículo

Se identifican como beneficios de los ejes direccionales, los siguientes:

- Reducción del despiste del vehículo, en sus diferentes modalidades
- Reducción del desgaste de las llantas
- Reducción del deterioro de los pavimentos

Se estima que aunque los beneficios económicos en cuanto a la disminución del desgaste de las llantas son difíciles de predecir, existiría un balance positivo para la productividad del transporte que se ubicaría en un beneficio alrededor de los 20 millones de dólares al año en la red carretera australiana.

Se asegura que es nulo el efecto global negativo de ejes direccionales sobre el desempeño dinámico de los vehículos, siempre y cuando se cuiden ciertos aspectos. Se estima que el empleo de ejes direccionales puede dar como resultado una disminución del número de vehículos pesados en las carreteras, con lo que la seguridad carretera se vería mejorada.

Como problema potencial de un esquema de implantación de tecnologías de ejes virables en las unidades remolcadas, los autores identifican el conflicto con las longitudes máximas permitidas para los vehículos. Esto es, la incorporación de ejes direccionales involucra el giro de estos, lo cual provoca un mayor largo efectivo de las unidades, al estar tales ejes ubicados en la parte trasera de los vehículos. Esta localización zaguera en las unidades remolcadas se derivaría de la necesidad de satisfacer los requerimientos de la distribución de la carga en puentes. De esta manera, la integración de los ejes direccionales en la última posición de las unidades remolcadas, implica modificar el largo permitido de los transportes. Por otro lado, se afirma que las mejoras que proporciona el uso de ejes direccionales, tienen que ver con el acceso de las combinaciones vehiculares a espacios reducidos, tales como bodegas o centros de abasto.

Por su parte, investigadores de la Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología en Pingtung, Taiwán, han realizado una investigación orientada al comportamiento dinámico de los ejes virables en semirremolques, empleando para ello un modelo de respuesta plana en oscilación direccional, y un esquema de control de la estabilidad direccional del vehículo (Wu y Lin, 2003). La motivación principal de tales investigaciones se ubica en el desarrollo de sistemas activos de control direccional, diseñados para mejorar el comportamiento a baja y alta velocidad del vehículo.

# 4.1.2 Estudios en Canadá y Estados Unidos

En Ontario y Québec se han hecho en los últimos 10 años tres estudios con miras a establecer las ventajas viales de los ejes virables en unidades remolcadas. El estudio en Ontario fue realizado en una institución federal (*Centre for Surface Transportation Technology, del Nacional Research Council of Canada*) para el gobierno provincial de Ontario; por su parte, los estudios en Québec, en las Universidades de Concordia y Laval, han respondido a inquietudes académicas y a necesidades del Ministerio de Transporte Provincial.

Mientras que los estudios realizados en Ontario por el Dr Billing (2003), han evaluado de manera integral las combinaciones vehiculares equipadas con ejes direccionales, incluyendo su desempeño a baja como a alta velocidad, y enfoques teóricos y de campo (Billing, 2004); los estudios en Concordia han consistido en evaluaciones teóricas del comportamiento dinámico de tales combinaciones (Luo,

2005), y aquellos en la Universidad de Laval han considerado ensayos en campo a baja y a alta velocidad (Corbin, *et al.*, 1995).

Adicionalmente, mientras que los estudios en Concordia cubren de manera especializada a los ejes autovirables, en el contexto de una investigación de maestría, los trabajos del Dr Billing incluyen tanto a ejes auto-direccionales como forzados.

#### Estudio del Centro para las tecnologías de transporte de superficie

La motivación para este estudio provino de la necesidad de introducir ejes direccionales en las combinaciones vehiculares, a fin de evitar totalmente el uso de ejes retractiles o "levantables" (*liftable axles*), así como obtener combinaciones "amigables" con la infraestructura. Una combinación amigable se calificó como aquella consistente en un eje virable delante de un eje tridem o de un tándem, el cual provocaría menos daño a la infraestructura.

En esta perspectiva, se requirió una evaluación exhaustiva de las combinaciones vehiculares a ser equipadas con ejes virables, con objeto de comprobar que las combinaciones propuestas, caracterizadas como amigables" con la infraestructura, resultasen al menos tan estables lateral y direccionalmente como las de uso actual, al ser evaluadas mediante metodologías de prueba estándar.

Una particularidad de este estudio consistió en la consideración de normas del estado de Michigan, Estados Unidos, dada la integración económica entre ambas regiones de estos países. Las evaluaciones comprendieron a los ejes tanto en posición retraída como extendida. Los factores que influyeron en la selección del número de ejes, tuvo que ver con la repartición uniforme de las cargas en los ejes, y con los requerimientos espaciales derivados de la direccionalidad de los ejes.

Los requerimientos normativos analizados incluyeron el bloqueo de los ejes autovirables al circular los vehículos a velocidad normal de carretera.

El tipo de vehículos bajo estudio comprendió al mostrado en la figura 4.1, que de acuerdo con la normatividad de Ontario se denomina 1S2113, para significar un tractor de tres ejes (1 2) y un semirremolque con dos ejes sencillos (1 1) en el "abdomen" del semirremolque, y un tridem en la parte posterior (3).

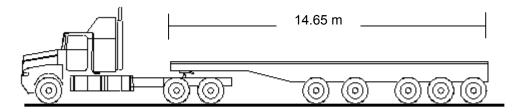


Figura 4.1. Configuración 12S113

La discusión sobre este tipo de vehículos incluyó la decisión de dónde colocar los ejes autodireccionales; esto es, en la parte del abdomen del semirremolque o en la parte posterior del tridem. Otros problemas que resultaron del estudio fueron los requerimientos de mantenimiento de los ejes direccionales, en especial lo relacionado a la lubricación de las partes y al alineamiento preciso de los ejes.

Se reporta el conocimiento de que los ejes autovirables, colocados en la parte de la "panza" del semirremolque, no ocasionan mayores problemas de estabilidad direccional. Sin embargo, se afirma que los ejes autodireccionales en la última posición del semirremolque, representan serios problemas de estabilidad direccional, por lo que se asume que tales ejes quedan bloqueados al operar el vehículo a velocidades normales de carretera.

Se señala que no es posible todavía incorporar los ejes autodireccionables en determinados transportes, como es el caso de las tolvas y aquellos que acarrean troncos. Se plantean como modificaciones a futuro, la incorporación de más de un eje autovirable en los semirremolques. Se puede identificar del reporte, que la adición de más ejes en los semirremolques conlleva la necesidad de más ejes tractivos en las unidades de arrastre. De esta manera, se plantean otros esquemas de tracción, como el de contar con tres ejes motrices en el tractor.

Estudios en la Universidad de Laval (Corbin, et al, 1995)

Los autores mencionan que las investigaciones tuvieron por objeto verificar la viabilidad de los principios de operación de ejes virables en unidades arrastradas, en el contexto de las condiciones norteamericanas de operación, de detectar las posibilidades de mejorar los equipamientos existentes con ayuda de esas tecnologías. El estudio incluyó un programa de demostración en servicio de los diversos equipamientos, el cual tuvo una duración de tres años. Asimismo, se efectuaron ensayos estáticos y dinámicos para verificar el comportamiento carretero de los transportes equipados con tales tipos de ejes.

Se menciona que en Québec, el empleo de ejes retractiles es problemático dado que son mal utilizados por los operadores; aparte de que muy pocas veces transmiten el peso permitido, señalando que como resultado de suspensiones mal calibradas o a la operación con los ejes retraídos, las cargas sobre los pavimentos se vuelven significativamente mayores. Circular con los ejes retraídos provoca además, una disminución en la estabilidad lateral del vehículo.

De esta manera, se concluye que la elevación de los ejes debe ser sustituida por alguna tecnología que permita que el eje permanezca en el pavimento, pero que a la vez facilite la maniobrabilidad del vehículo. Esta situación es la que ha llevado a la propuesta de recurrir a ejes virables en los semirremolques.

Se indica que en Canadá existe un consenso en cuanto a algunas características que deben tener los sistemas de ejes autovirables. Por ejemplo, una distancia de 12.5 cm entre el perno rey y el pivote de la rueda, a fin de que las llantas sigan la trayectoria del vehículo (efecto del *caster*), y ofrezcan una vía de retorno a la posición central. Se dice que un ángulo de 90° entre el pivote del perno rey y el pavimento asegurará un punto de contacto constante entre la carpeta y la llanta.

Como segunda característica se menciona que deben contar con un mecanismo de autocentrado, que produzca cierta fuerza que asegure la estabilidad del eje durante la aplicación de fuerzas diferentes a los dos extremos del mismo (por obstáculos en el pavimento, frenado en superficies diferentes o frenos mal calibrados). Este mecanismo aseguraría un retorno suave del eje a la posición central, facilitando además el desarrollo de una fuerza de viraje (cornering force).

Se menciona en este estudio que las normatividades en Europa y Norteamérica van en sentido opuesto en lo que respecta a la posición del eje autovirable. Mientras que en Europa se permite ubicarlo al final de los remolques, en Norteamérica se debe colocar por delante de los ejes triples o dobles de los semirremolques. Esto se debe a que la norma europea es explícita en cuanto al radio de giro para una maniobra de 90°, que debe representar un barrido entre radios de 5.3 y 12.5 m, de acuerdo con la orografía de los diferentes países que conforman ese Continente.

Se indica además que en Québec, parte de la justificación para ubicar el eje direccional delante de los grupos de ejes traseros de los semirremolques, se asocia a la intención de prohibir los ejes retráctiles en esa provincia, por lo que el empleo de un eje direccional viene a compensar que los ejes en la "panza" del semiremolque no sean retráctiles.

Se reportan diferentes situaciones en las que el eje autovirable puede representar un problema, derivado ello de la falta de capacidad de ese eje para transmitir fuerza de viraje.

Reconociendo estas limitaciones, se señala que usados correctamente, los ejes autovirables presentan características y ventajas de interés, incluyendo la capacidad de alinearse a la dirección del trayecto, lo cual debe reducir el desgaste de las llantas y la fatiga de los pavimentos. Por otro lado, su empleo, en vez de ejes retráctiles, permite mantener esos ejes en contacto con la carpeta estando el vehículo moviéndose hacia delante. En reversa, se debe elevar al eje o mantenerlo bloqueado en posición neutra.

Como parte de las investigaciones reportadas en ese artículo, en Québec se instituyó un programa de demostración que tuvo como objeto evaluar en servicio los ejes autovirables, verificando las características funcionales siguientes: instalación; comportamiento y desempeño; confiabilidad; mantenimiento;

desgaste, y costo. El programa consistió en instalar los ejes autovirables en cuatro configuraciones diferentes de semirremolques. En cada una de ellas, dos vehículos se equiparon con ejes autovirables; mientras que los otros dos conservaron sus ejes retráctiles convencionales.

Los 16 vehículos (ocho con ejes autovirables y ocho con ejes retráctiles) se evaluaron en servicio a lo largo de tres años (1991 – 1994), por el Centro de Investigación Industrial de Quebec (CRIQ), a fin de verificar sus bondades de operación. Se informa que en la medida de las posibilidades, los cuatro vehículos de la misma configuración efectuaron los mismos recorridos, con igual carga y conductores habituales. Diversas empresas privadas participaron como usuarias de los vehículos y otras como proveedoras del mantenimiento mecánico. Las diferentes cajas de los semirremolques tuvieron 40 y 48 pies, y las combinaciones vehículares mezclaron suspensiones de aire y de muelles.

La selección de los equipamientos empleados dependió de sus costos y de su disponibilidad en las regiones de las pruebas. Otros factores influyeron, tal como el ancho de vía y el tamaño de las llantas. La tabla 4.1 muestra las características de las unidades ensayadas en campo. Aunado a este estudio testimonial, se llevaron a cabo análisis del desempeño carretero y estático, incluyendo el despiste a alta velocidad y el umbral estático de volcadura. En la siguiente sección se presentan algunos resultados del estudio.

Tabla 4.1. Configuraciones y especificaciones técnicas de los estudios de servicio coordinados por la Universidad de Laval (Corbin, et al, 1995)

| Tipo | Masa total<br>cargado                                      | Distancia<br>entre ejes<br>m | Marca de<br>eje<br>autovirable | Ancho<br>entre<br>perchas<br>m | Marca<br>suspensión           | Suspensión<br>trasera                    |
|------|--|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| A    | Semirremolqu<br>e de 3 ejes<br>Largo: 14.65 m<br>52 500 kg | 3.04 – 1.83                  | SAF                            | 1.81                           | Sauer                         | De aire<br>ecualizada<br>para los 3 ejes |
| В    | Semirremolqu<br>e de 3 ejes<br>Largo: 14.65 m<br>52 500 kg | 3.04 – 1.83                  | Ceschi                         | 1.81                           | Hendrickson-<br>Turner Ht-230 | Tándem con<br>suspensión de<br>hojas     |
| С    | Semirremolqu<br>e de 3 ejes<br>Largo: 12.22 m<br>52 500 kg | 2.43 – 2.43                  | Knight-<br>Trailer             | 1.96                           | Knight-Trailer                | Tándem con<br>suspensión de<br>hojas     |
| D    | Semirremolqu<br>e de 4 ejes<br>Largo: 14.65 m<br>55 500 kg | 2.42 - 1.52<br>- 1.52        | Steffan                        | 1.96                           | Neway AR-90                   | Tridem con<br>suspensión de<br>hojas     |

#### Estudios en la Universidad de Concordia (Luo, 2005)

Las investigaciones en la Universidad de Concordia se dan como una continuación de un cúmulo de estudios que se llevaron a cabo entre 1989 y 1991, referentes a la utilización de los ejes autovirables en unidades remolcadas. En tales trabajos se participó como parte de una representación canadiense, que incluyó a John Woodrooffe (1989a; 1989b), Sankar (1991), S Rakheja y Piche. Por parte de Estados Unidos, intervinieron LeBlanc (1989, 1992) y El-Gindy (1991).

Tanto Sankar como Rakheja formaban en ese entonces, parte del personal académico de la Universidad de Concordia, y sus estudios se orientaron a evaluar los riesgos viales de introducir ejes direccionales forzados en unidades tanto articuladas como no articuladas.

Recientemente, bajo la dirección del Dr Subhash Rakheja, y como resultado de pláticas con el Ministerio del Transporte de Québec, se identificó la necesidad de continuar en 2003 con las investigaciones sobre ejes direccionales en semirremolques. La motivación al respecto coincide con lo planteado en los trabajos de J Billing; esto es, de eliminar los ejes retráctiles y sustituirlos por direccionales. Hasta el momento, no se ha vislumbrado el desarrollo de esquemas de control activo para tales sistemas de dirección.

La metodología a que se recurrió en esa Universidad consistió en aumentar el alcance de un programa de cómputo ampliamente empleado en el medio, llamado yaw-roll. El alcance mejorado de ese programa se orientó a la consideración tanto de los ejes direccionales en las unidades remolcadas, como a las perturbaciones provenientes del perfil del pavimento. Los trabajos se han dado en un contexto de investigación para tesis de maestría, de la cual se cuenta con los manuscritos y programas desarrollados, proporcionados de primera mano por el Dr Subhash Rakheja.

#### Estudios en la Universidad de Michigan, UMTRI (Winkler, 1998)

C Winkler, del Instituto de Investigación en el Transporte de la Universidad de Michigan (UMTRI: *University of Michigan Transportation Research Institute*), llevó a cabo a finales de los noventas, investigaciones relacionadas con la medición del desempeño dinámico en oscilación direccional (*yaw*), de vehículos equipados con ejes virables al girar estos ejes por efecto del denominado avance de la alineación, o *caster* (Winkler, 1998). El autor examinó la influencia potencial sobre la desestabilización de la unidad, de un eje montado en la parte trasera (*booster axle*), tanto en el caso de un semirremolque como para un vehículo no articulado.

El investigador encontró que tal eje, por lo general degrada las características de manejo y de estabilidad direccional de los vehículos, aunque reconoce que otros diseños más avanzados de ejes virables, pudieran mejorar de manera sustancial el desempeño vehicular. Una descripción de sus resultados se presenta en la siguiente sección.

# 4.1.3 Estudios en Inglaterra

En la Universidad de Cambridge se conformó a mediados de los años noventa el *Cambridge Vehicle Dynamics Consortium (CVDC)*, en el que intervino un grupo multidisciplinario y multinacional de compañías y universidades que buscaban, entre otras cosas, mejorar los sistemas de transporte carretero mediante la incorporación de tecnologías avanzadas para los diferentes sistemas que conforman a los vehículos pesados (CVDC, 2005).

Dentro del conjunto de estudios para mejorar transportes pesados, se tiene el de vehículos articulados con sistemas de dirección, activos (active steering of articulated vehícles).

Se indica que los trabajos enfocados a obtener un semirremolque con dirección activa continúan, esperando que tal semirremolque innovador reduzca el ancho de barrido de los vehículos, el barrido de la zaga y el frotado de las llantas. Asimismo, se espera que tales sistemas de dirección activos mejoren el desempeño de los transportes a alta velocidad, como es la amplificación de la zaga y el despiste. Entre las empresas participantes del proyecto se cuentan *ArvinMeritor*, *FM Engineering*, *Fluid Power Design* y *Haldex*. Este proyecto simulará el comportamiento de ejes virables, y propondrá un sistema de control óptimo.

Las pruebas de prototipos de estos sistemas de control se iniciaron en abril del 2004, y aunque todavía no existen referencias públicas sobre los resultados de los ensayos experimentales, algunas imágenes de las pruebas, incluyendo videos, pueden consultarse en línea :

(http://www.cvdc.org/movies/active steering.html).

En la siguiente sección se discuten algunos resultados de esos trabajos, que atienden la parte teórica de las investigaciones y han sido reportados por Jujnovich y Cebon (2002).

## 4.2 Resultados en la literatura

Los resultados reportados en las diferentes publicaciones, se han clasificado de acuerdo con las medidas de desempeño evaluadas. Se hace notar que las fuentes de información son las mismas que las descritas metodológicamente en la sección anterior.

# 4.2.1 Efecto de ejes virables sobre el desempeño geométrico a baja velocidad

Coleman y Sweatman (2002), reportan resultados de simulaciones del desempeño de varias combinaciones vehiculares durante una vuelta de 90 grados, incluyendo las mostradas en la figura 4.2. Estos transportes incluyen dos combinaciones tractor-semirremolque, con diferentes longitudes de caja y distancia entre ejes, tanto para el tractor como para el semirremolque.

La figura 4.3 muestra resultados de simulaciones en cuanto al efecto que un eje virable en la última posición del semirremolque de los vehículos de la figura 4.2, tiene sobre el ancho total de barrido.

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran, respectivamente, los resultados para las otras medidas de desempeño: barrido frontal y de la zaga. La desinencia **Ref** y **Dir** en estas figuras se refieren al vehículo normal y con eje direccional, respectivamente.

Se puede observar en estos resultados que la incorporación del eje direccional produce, por un lado, un incremento del barrido de la zaga, y por otro, una disminución tanto del ancho total de barrido como del barrido frontal. El desarrollo del barrido de la zaga constituye, entonces, una situación riesgosa que puede provocar accidentes por efecto de la invasión del vehículo sobre el espacio adyacente en la dirección opuesta a la maniobra direccional.

Las variaciones porcentuales producidas en las distintas medidas de desempeño se presentan en la tabla 4.2, dejando ver que el efecto global de la incorporación de un eje trasero autovirable sobre el desempeño geométrico de este tipo de combinaciones vehiculares, depende tanto del tipo de medida de que se trate como de las características del transporte.

El mayor beneficio respecto al ancho total de barrido se identifica en la combinación de mayor longitud, que manifiesta una reducción del 5.71 %; mientras que las otras medidas de desempeño tienden a deteriorarse. Algunas de ellas de manera significativa, como es el caso del barrido de la zaga.

De acuerdo con esto, las ventajas relativas de la incorporación de un eje direccional en la última posición dependen del objetivo de desempeño que se persiga. Esto se apreciará claramente al efectuar simulaciones a alta velocidad.

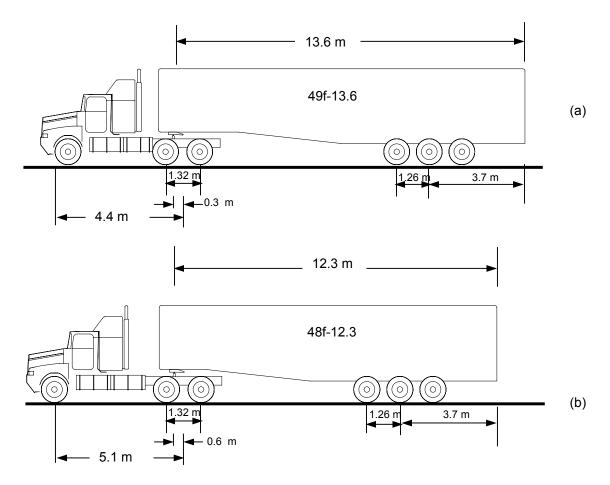
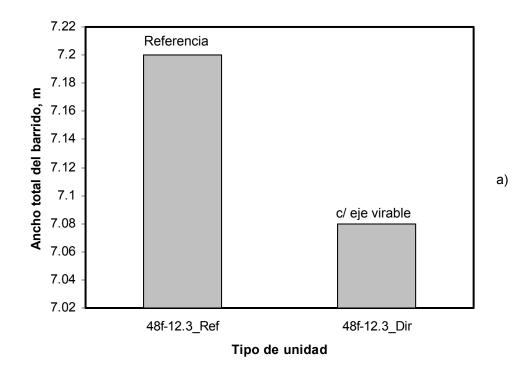


Figura 4.2. Equipos base y modificados. Los vehículos modificados cuentan con el último eje autodireccionable, a) 49f-13.6; b) 48f-12.3

Tabla 4.2. Variaciones porcentuales de las medidas de desempeño por efecto del eje direccional en el último eje

| Vehículo  | Medida de desempeño    | Variación porcentual por introducción del eje autovirable |  |
|-----------|------------------------|---|--|
| 48f-12.3. | Ancho total de barrido | -1.8  |  |
| 48f-12.3. | Barrido frontal        | 0.9   |  |
| 48f-12.3. | Barrido de la zaga     | N.A.  |  |
| 49f-13.6  | Ancho total de barrido | - 5.71  |  |
| 49f-13.6  | Barrido frontal        | 17  |  |
| 49f-13.6  | Barrido de la zaga     | 145   |  |



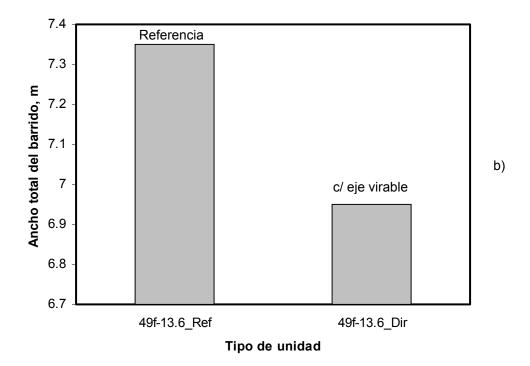


Figura 4.3.
Simulación del efecto del eje direccional sobre el ancho total de barrido de las combinaciones vehiculares de la figura 4.2 a) 48f-12.3; b) 49f-13.6

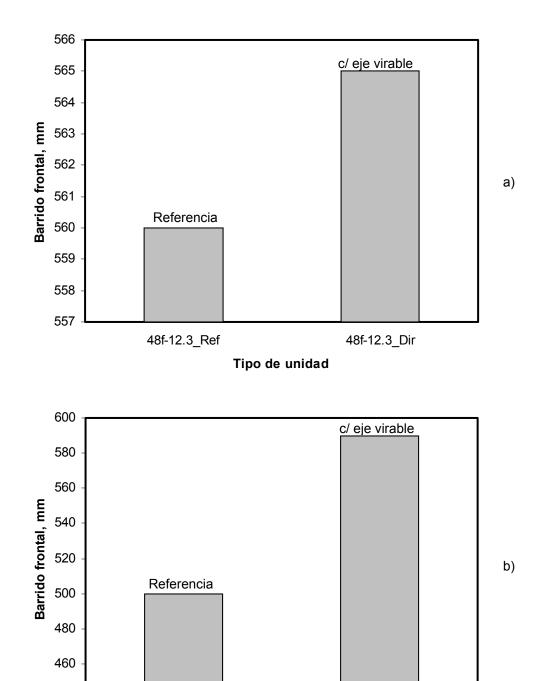


Figura 4.4.
Simulación del efecto del eje direccional sobre el barrido frontal de las combinaciones vehiculares de la figura 4.2; a) 48f-12.3; b) 49f-13.6

Tipo de unidad

49f-13.6\_Dir

49f-13.6\_Ref

440

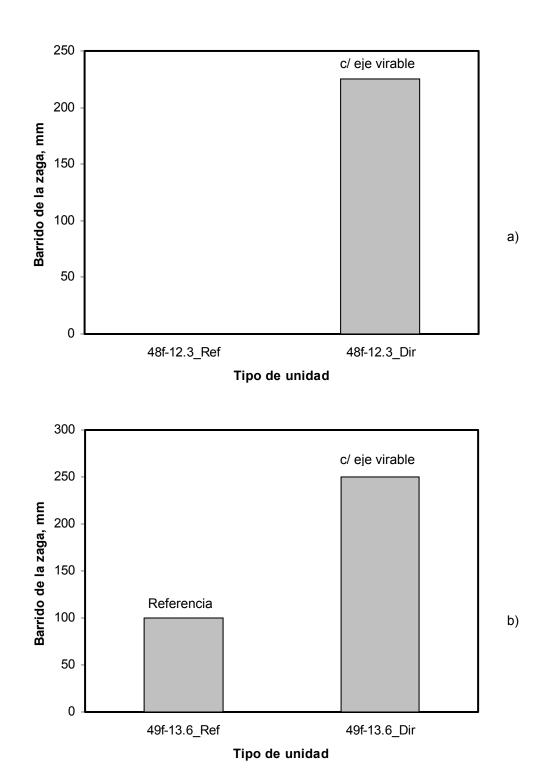


Figura 4.5.
Simulación del efecto del eje direccional sobre el barrido de la zaga delas combinaciones vehiculares de la figura 4.2; a) 48f-12.3; b) 49f-13.6

Billing (2003), también reporta resultados de simulaciones para distintas medidas de desempeño y combinaciones vehiculares. Estas combinaciones no se emplean en México, por lo que se muestran aquí sólo como ilustración, y constituyen variantes de ejes múltiples (tridem o cuádruples), los cuales se colocan por delante o detrás de ejes sencillos autovirables (figura 4.6.). La denominación de estas combinaciones corresponde a los ejes individuales y múltiples de los semirremolques. Por ejemplo, la denominación 12S131, nombra un tractor de tres ejes y un semirremolque de cinco ejes (eje sencillo – tridem – eje sencillo).

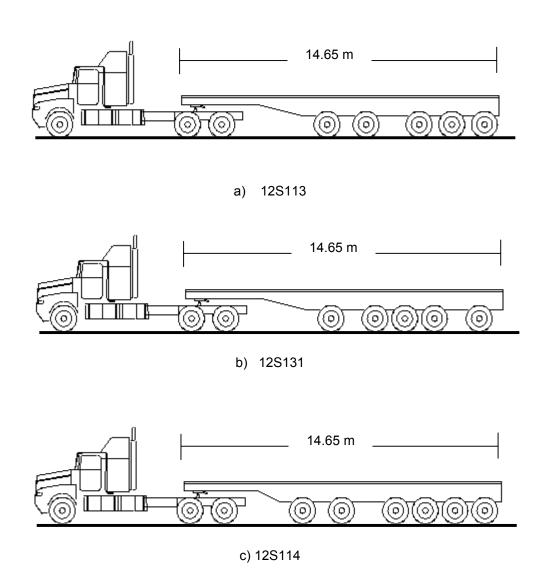


Figura 4.6.
Configuraciones estudiadas por Billing (2003)

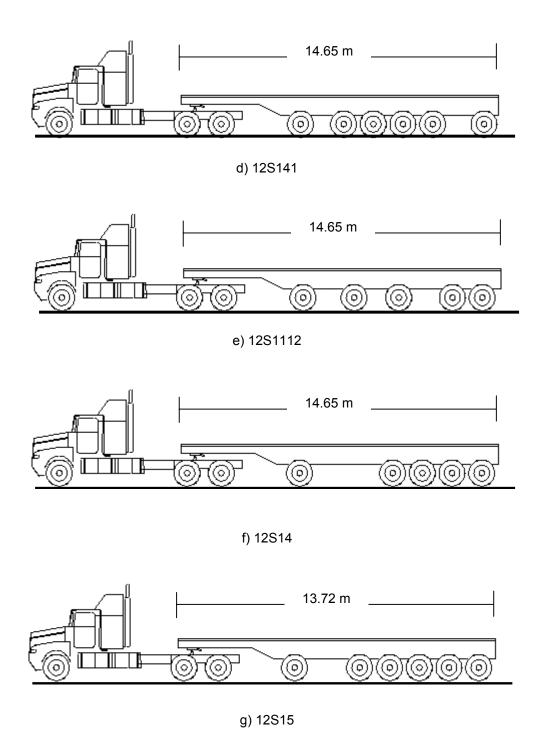
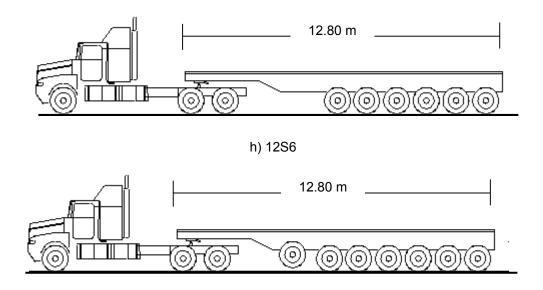


Figura 4.6.
Configuraciones estudiadas por Billing (2003), (cont)



i) 12S7

Figura 4.6.
Configuraciones estudiadas por Billing (2003) (cont)

Las medidas de desempeño a baja velocidad empleadas por Billing fueron las siguientes:

- Barrido de la zaga
- Demanda de fricción
- Fricción lateral utilizada
- Ángulo de viraje máximo

Las condiciones de las pruebas incluyeron dos diferentes posiciones del centro de gravedad en cuanto a su altura (alto y bajo), y las dos posiciones del eje retráctil, localizado en general en la parte central del cuerpo del semirremolque.

La figura 4.7 muestra un ejemplo de los resultados de Billing; en este caso para el vehículo 12S113, que compara el efecto de las posiciones del centro de gravedad y las dos posiciones de los ejes retráctiles. Esto revela que el ancho total de barrido disminuye aproximadamente en 1 m por efecto del eje autovirable, sin importar la altura del centro de gravedad. Un efecto negativo se refiere acerca del barrido de la zaga ante la incorporación del eje autovirable, ya que este parámetro incrementa varias veces su magnitud. Otro efecto también negativo se refiere a la demanda de fricción en las ruedas del eje motriz. De acuerdo con esto, no existe una tendencia única (positiva o negativa) en cuanto al efecto de la introducción del eje direccional en esta combinación.

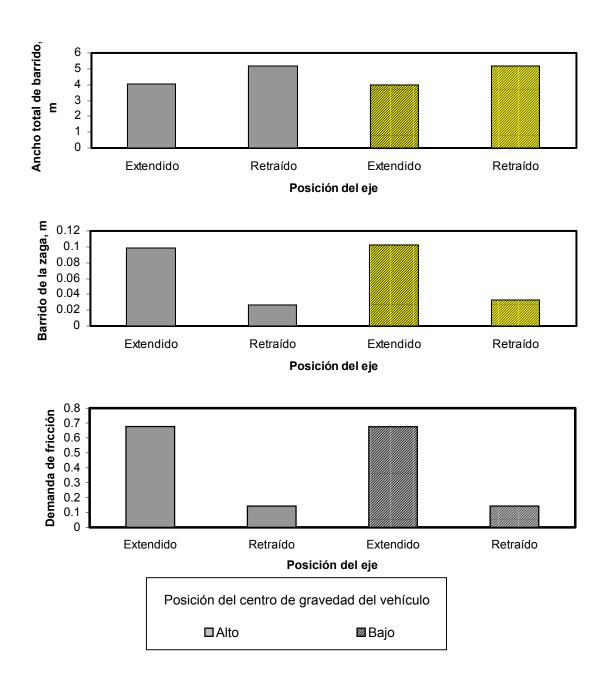


Figura 4.7.
Resultados a baja velocidad de un vehículo, tipo 12S113 (Billing, 2003)

La figura 4.8 muestra el vehículo considerado en las investigaciones de Jujnovich y Cebon (2002), consistente en un tractor de dos ejes y un semirremolque de tres ejes. Al último de estos ejes es al que se le han considerado diferentes tipos de mecanismo de dirección, incluyendo un dispositivo de pivoteo (tornamesa), de comando y de autoviraje.

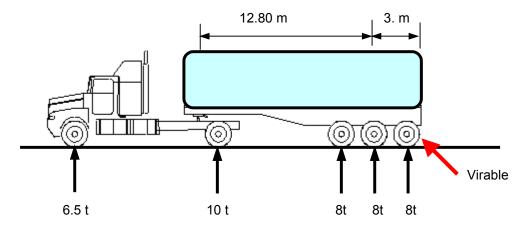


Figura 4.8. Vehículo 12S113, simulado por Jujnovich y Cebon (2002)

Atendiendo diferentes medidas de desempeño a baja velocidad, la figura 4.9 muestra algunos resultados normalizados del efecto de la introducción de los diferentes tipos de mecanismo direccional, pudiéndose observar como característica común de todas estas gráficas, que la incorporación de la direccionalidad de este último eje implica una mejora en todos los parámetros de desempeño considerados: fuerza lateral en círculo; fuerza lateral en rebase; y ancho total de barrido. Esto se da sin importar que el eje analizado sea del tractor o del semirremolque.

El eje pivotado, a manera de eje autovirable en tornamesa, representa aquí la mejor opción para incrementar el desempeño de este vehículo equipado con el último eje virable. Un eje autovirable representa la mínima mejora por cuanto a los parámetros de desempeño presentados. Es importante señalar que otros parámetros de desempeño resultarían deteriorados por efecto de la adición del último eje direccionable, como se ejemplificó en el apartado anterior.

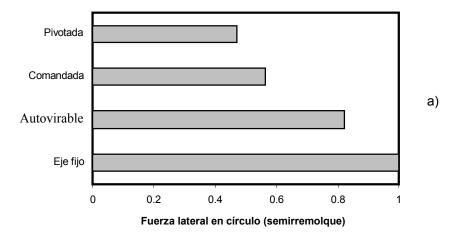


Figura 4.9.Resultados normalizados a baja velocidad de un vehículo, tipo 12S113 (Jujnovich y Cebon, 2002)

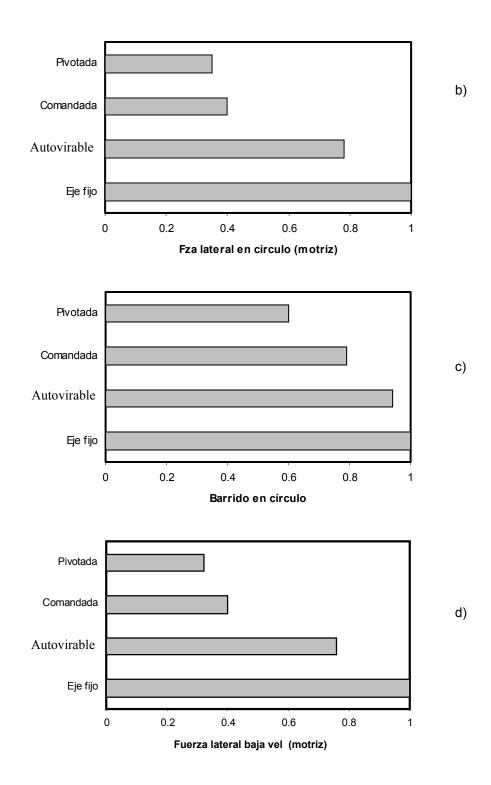


Figura 4.9.
Resultados normalizados a baja velocidad de un vehículo tipo 12S113 (Jujnovich y Cebon, 2002) (cont)

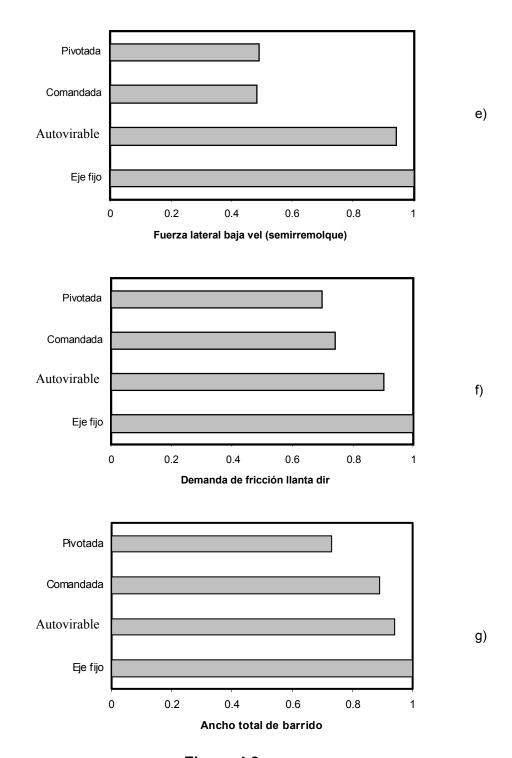


Figura 4.9.

Resultados normalizados a baja velocidad de un vehículo tipo 12S113

(Jujnovich y Cebon, 2002) (cont)

# 4.2.2 Efecto de ejes direccionales en el desempeño a alta velocidad

Investigación de Sheng Lou (Concordia University)(2005)

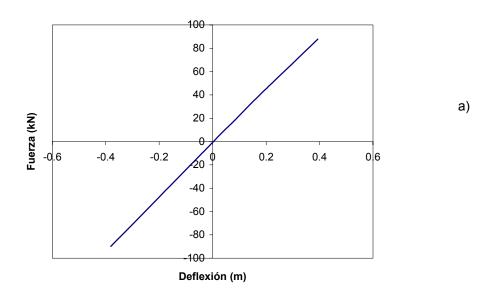
Los trabajos de simulación consideraron en este caso una variedad de configuraciones vehiculares de tractor-semirremolque, con diferente número de ejes virables y retráctiles. De manera particular, las simulaciones se concentraron en los efectos a alta velocidad, incluyendo las respuestas geométricas y su efecto en el pavimento.

Las simulaciones se realizaron a partir de un programa *yaw-roll* modificado, incorporando las propiedades geométricas y operacionales de las combinaciones vehiculares, la rugosidad del pavimento y la direccionalidad de los ejes.

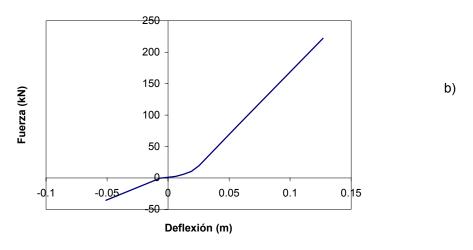
Las figuras 4.10 a 4.13 muestran las propiedades de los diferentes componentes del vehículo simulado, que incluyen lo siguiente:

- Diagramas fuerza-deflexión, tanto para el eje direccional como para los motrices y de la suspensión de aire considerada para los ejes adicionales incorporados, como se muestra en la figura 4.10. Se contemplaron dos diferentes ajustes de rigidez para el caso de estas suspensiones de aire, como se aprecia en las secciones c) y d) de la figura. Para el eje direccional, se asume la relación lineal de la parte a); para la suspensión del eje motriz se considera el comportamiento no lineal de la parte b).
- Diagramas de las fuerzas laterales versus ángulo de deslizamiento de las ruedas, como una función de la carga vertical de las ruedas (figura 4.11). Estas relaciones son altamente no lineales, y son las que finalmente lograrán el cambio direccional de la unidad, afectando la dependencia de la carga vertical la estabilidad direccional del vehículo. Las fuerzas verticales son una función, tanto del nivel de carga como de la respuesta dinámica de éste al perfil del pavimento.
- Diagramas de los momentos de autoalineamiento, como una función del ángulo de deslizamiento, y en términos de la carga vertical de las llantas (figura 4.12). Estos diagramas indican un corrimiento del ángulo de deslizamiento en el que se presenta el máximo momento de desalineamiento al incrementar la carga vertical.
- Las características de viraje de las llantas del eje delantero, representadas como fuerzas direccionales contra el ángulo de la dirección (figura 4.13)

Estas diferentes curvas de comportamiento de la suspensión de los vehículos, se incorporan como tablas de datos en el programa *yaw-roll* modificado.

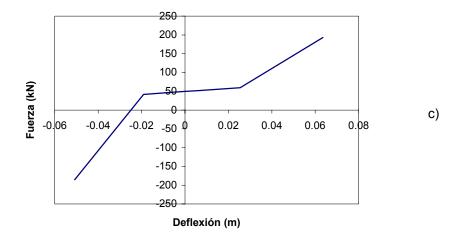


a) Suspensión del eje direccional

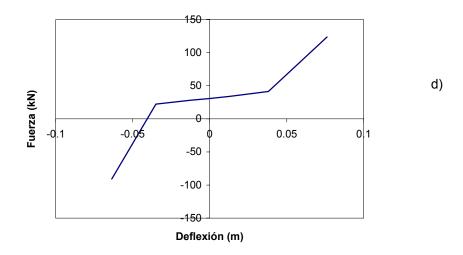


b) Muelle de los ejes motrices

Figura 4.10.
Características fuerza-deflexión de las suspensiones consideradas en la investigación de Luo (2005)



c) Suspensión de aire Neway AR 95-17 (ajuste de carga: 107 kN)



d) Suspensión de aire Neway AR 95-17 (ajuste de carga: 71 kN)

Figura 4.10.

Características fuerza-deflexión de las suspensiones consideradas en la investigación de Luo (2005) (cont)

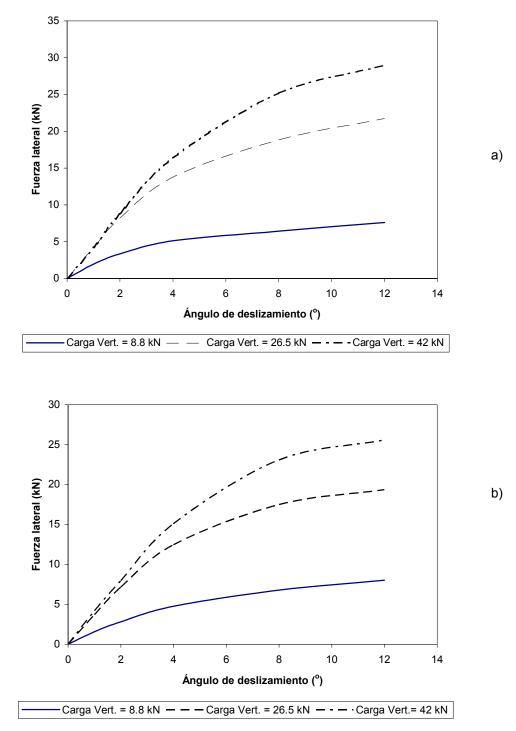


Figura 4.11
Diagramas de fuerzas características de viraje de las llantas en la investigación de Luo (2005): a) eje delantero; b) eje motriz y del semirremolque

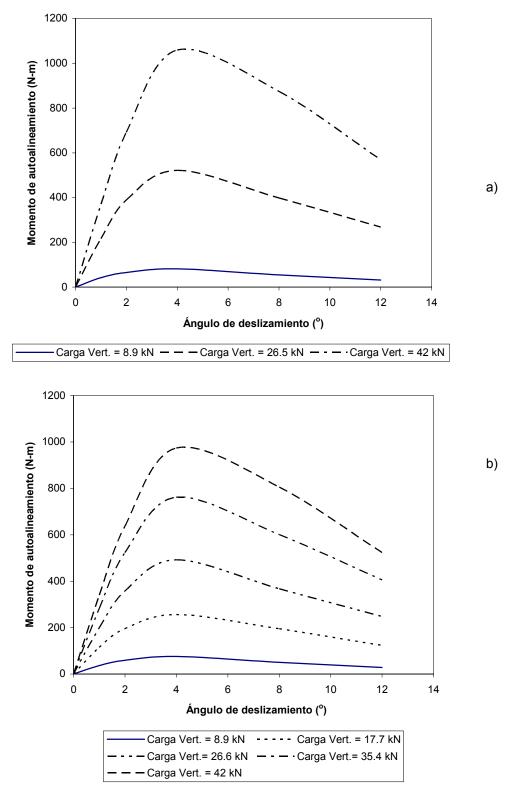


Figura 4.12. Diagramas de momentos de autoalineamiento del viraje de las llantas en la investigación de Luo (2005): a) eje delantero; b) eje motriz y del semirremolque

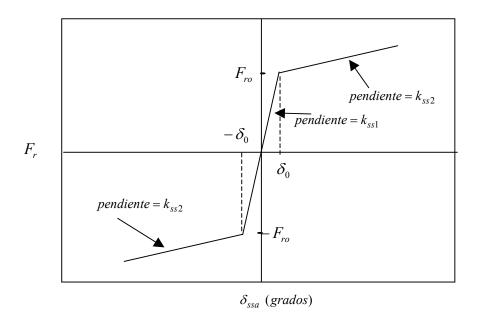


Figura 4.13.

Características de viraje de las llantas del eje delantero de las suspensiones consideradas en la investigación de Luo (2005)

En la investigación de Luo, los transportes comprenden variantes de los arreglos vehiculares actualmente en circulación en Quebec, incluyendo ejes en tándem y tridem a los cuales se les incorpora uno o varios ejes direccionales. Las figuras 4.14 a la 4.17 ilustran las configuraciones estudiadas, las cuales parten de un semirremolque con un tándem al que se le adiciona un eje en la parte central del semirremolque. Los arreglos subsecuentes consisten en un tridem al que se le añade de uno a tres ejes en la parte central del semirremolque.

En general, en estas combinaciones vehiculares la posición de la quinta rueda en el bastidor del tractor se encuentra desplazada ligeramente hacia delante, una distancia de 0.38 m. La posición vertical del centro de gravedad en la caja de todos los camiones se asume constante, localizado a 2.29 m sobre el pavimento.

Las condiciones de descarga en cada eje y los pesos brutos vehiculares respectivos de cada combinación se presentan como una función del eje que se encuentre levantado. Esta información se incluye en las tablas de la parte inferior de cada una de las figuras de las combinaciones simuladas (tablas de la 4.3 a la 4.6).

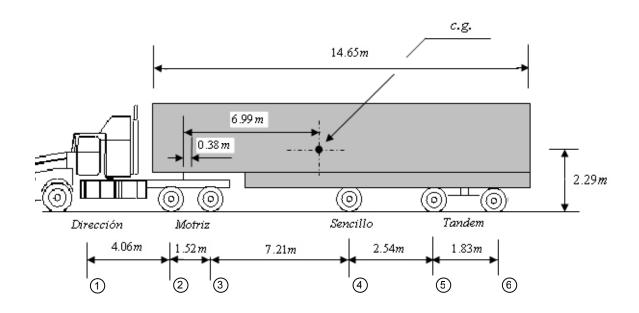


Figura 4.14. Configuración 12F12 (Luo, 2005)

Tabla 4.3.
PBV y cargas en los ejes de la configuración 12F12 (Luo, 2005)

| Tipo de ejes  | PBV<br>(kN) | Cargas en los ejes (kN) |        |               |        |  |
|---|-------------|-------------------------|--------|---------------|--------|--|
|   |             | Tractor                 |        | Semirremolque |        |  |
|   |             | Frontal                 | Motriz | Sencillo      | Tándem |  |
| Convencional/autovirabl<br>e o retráctil en la<br>posición de trabajo | 506.17      | 49.00                   | 176.40 | 93.59         | 187.18 |  |
| Eje retráctil levantado   | 506.17      | 51.20                   | 201.81 | 1             | 253.16 |  |

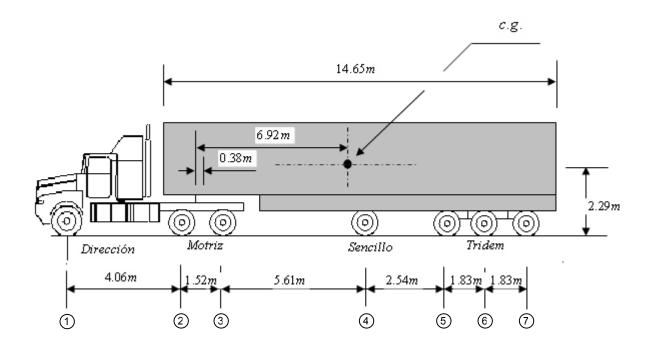


Figura 4.15. Configuración 12F13 (Luo, 2005)

Tabla 4.4.
PBV y cargas en los ejes de la configuración 12F13 (Luo, 2005)

|   | PBV    | Cargas en los ejes (kN ) |        |               |        |  |
|---|--------|--------------------------|--------|---------------|--------|--|
| Tipo de eje   |        | Tractor                  |        | Semirremolque |        |  |
|   | (kN)   | Dirección                | Motriz | Sencillo      | Tridem |  |
| Convencional/autovira<br>ble o retráctil en la<br>posición de trabajo | 555.66 | 49.00                    | 176.40 | 82.57         | 247.70 |  |
| Eje retráctil levantado   | 555.66 | 51.58                    | 206.25 | /             | 297.83 |  |

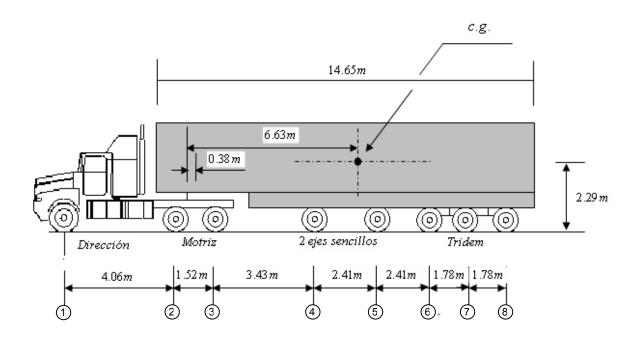


Figura 4.16. Configuración 12F113 (Luo, 2005)

Tabla 4.5.
PBV y cargas en los ejes de la configuración 12F113 (Luo, 2005)

|   | PBV    | Cargas en los ejes ( kN ) |        |               |          |        |  |
|---|--------|---------------------------|--------|---------------|----------|--------|--|
| Tipo de ejes  |        | Tractor                   |        | Semirremolque |          |        |  |
|   | (kN)   | Dirección                 | Motriz | Sencillo      | Sencillo | Tridem |  |
| Convencional/a<br>utovirable o<br>retráctil en la<br>posición de<br>trabajo | 559.58 | 49.00                     | 176.40 | 49.00         | 49.98    | 235.20 |  |
| Eje 4 levantado   | 559.58 | 50.60                     | 194.87 | 1             | 73.85    | 240.26 |  |
| Eje 5 levantado   | 559.58 | 49.40                     | 180.87 | 72.98         | 1        | 256.33 |  |
| Ejes 4 y 5<br>levantados  | 559.58 | 52.78                     | 220.40 | 1             | 1        | 286.39 |  |

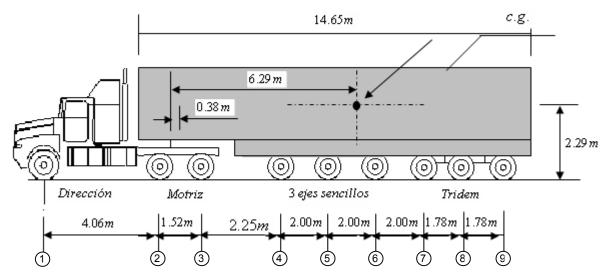


Figura 4.17. Configuración 12F1113 (Luo, 2005)

Tabla 4.6.
PBV y cargas en los ejes de la configuración 12F1113 (Luo, 2005)

|  |        | Cargas en los ejes (kN) |        |               |          |          |        |
|--|--------|-------------------------|--------|---------------|----------|----------|--------|
| Tipos de ejes (4#,5#,6#)                                       | PBV    | Tractor                 |        | Semirremolque |          |          |        |
|  | (kN)   | Dirección               | Motriz | Sencillo      | Sencillo | Sencillo | Tridem |
| Convencional/autovirable o retráctil en la posición de trabajo | 564.48 | 49.00                   | 176.4  | 32.34         | 32.34    | 39.20    | 235.20 |
| Eje 4 levantado  | 564.48 | 49.98                   | 187.6  | /             | 49.00    | 41.42    | 236.46 |
| Eje 5 levantado  | 564.48 | 49.44                   | 181.3  | 42.91         | 1        | 49.42    | 241.32 |
| Eje 6 levantado  | 564.48 | 49.11                   | 177.5  | 35.94         | 50.57    | /        | 251.37 |
| Ejes 4/5 levantados  | 564.48 | 51.31                   | 203.1  | /             | /        | 62.02    | 247.98 |
| Ejes 5/6 levantados  | 564.48 | 49.53                   | 183.4  | 83.22         | /        | /        | 268.86 |
| Ejes 4/5/6 levantados  | 564.48 | 52.82                   | 220.8  | /             | /        | /        | 290.83 |

Las maniobras simuladas comprenden un cambio de carril y una maniobra de vuelta de 90° a velocidad constante.

De manera particular, se introduce en esa investigación el efecto del perfil del pavimento sobre el comportamiento de las unidades, lo cual representa una diferencia con respecto a otros estudios.

Los resultados de las simulaciones se presentan por grupos de medidas de desempeño: cociente de transferencia lateral de carga (*CTLC*); magnificación de la zaga (*AZ*); demanda de fricción a alta velocidad (*DFAV*); y demanda de fricción a baja velocidad (*DFBV*).

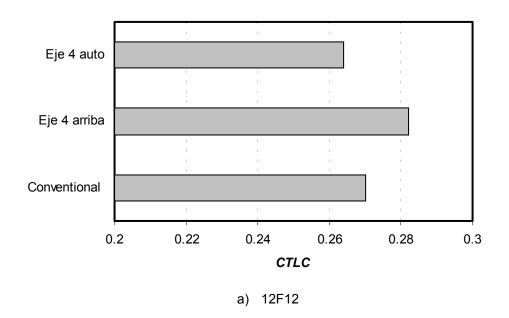
Los resultados analizados en el presente trabajo se refieren solamente a dos de las configuraciones ya descritas: la 12F12 y la 12F1113. Ambas describen las situaciones en sus diversos niveles de complicación ante el número de ejes en el semirremolque respectivamente. Por otra parte, y salvo que se indique de otra manera, los resultados del documento de Luo corresponden a un cociente de amortiguamiento de 0.05, y un pavimento totalmente plano. Es importante mencionar que no se aprecia un efecto notable del nivel del amortiguamiento en las simulaciones.

La figura 4.18 contiene las variaciones del cociente de transferencia lateral de carga, como una función de la configuración vehicular y de las condiciones de los ejes, indicando que para el transporte 12F12, la elevación del cuarto eje provoca el incremento en la transferencia lateral de carga, mientras que los valores mínimos se obtienen para el eje autovirable.

Para el caso del vehículo 12F1113, levantar el eje 6 representa desarrollar el más alto valor para los cocientes de transferencia lateral de carga; mientras que los menores valores para la transferencia lateral de carga se observan, en el caso del automotor convencional (i e, con los ejes 4,5 y 6 fijos). Cualquier cambio en esta configuración básica deteriora la transferencia de carga en este tipo de transporte. Elevar o dejar trabajando al eje 4 no representa un mayor efecto en la transferencia lateral de carga. Dejar el 6 arriba, y hacer autovirable al 4 son acciones aproximadamente equivalentes a elevar los ejes 4 y 5, desde el punto de vista de la transferencia lateral de carga.

El cúmulo de circunstancias en estos resultados para el vehículo 12F1113, representa variaciones en un rango que va de 0.21 a 0.265, el cual señala una tendencia equivalente con respecto a la tendencia a la volcadura. Esta variación revela, no obstante, que la configuración de los ejes cuanto a direccionales o fijos, y levantados o sobre el piso, incide de manera importante sobre la estabilidad lateral y tendencia a la volcadura del vehículo 12F1113.

Aparentemente, en esta investigación no se consideró a variación de la altura del centro de gravedad del vehículo al elevar cualquiera de sus ejes, lo cual de acuerdo con Coleman y Sweatman (2002), tiene un efecto no despreciable en el comportamiento de los transportes equipados con ejes retráctiles.



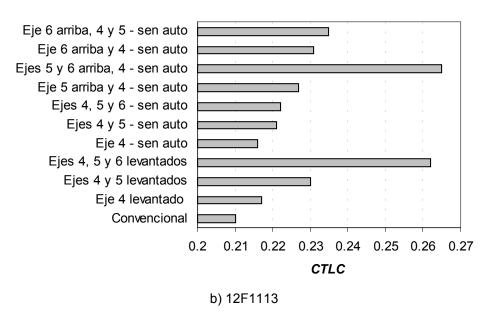


Figura 4.18.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre el *CTLC* de dos vehículos de prueba, para pavimento perfecto y un cociente de amortiguamiento de 0.05 (Luo, 2005)

La figura 4.19 ilustra los resultados de Luo por acerca de la amplificación de la zaga (AZ) de las combinaciones 12F12 y 12F1113, al realizar una maniobra estándar de cambio de carril (Cap 2). Al respecto, en cuanto a los resultados para el vehículo 12F12, la peor situación la representa el eje elevado; siendo la mejor circunstancia emplear uno direccional autovirable. Las variaciones, sin embargo, son sólo de alrededor del 10 % desde el valor mínimo hasta el máximo, para esta medida de desempeño y vehículo.

Para el vehículo 12F1113, la peor situación se presenta al levantar los ejes 5 y 6, y hacer al 4 autodireccionable. La mejor situación consiste en hacer virables los tres ejes sencillos, lo cual refleja los efectos positivos de la virabilidad de los ejes.

De acuerdo con estos resultados, tres situaciones equivalentes se representan de la siguiente manera:

```
Eje 6 arriba, 4 y 5 autovirables – eje 6 arriba, autovirable el 4

Eje 5 arriba, autovirable el 4 – ejes 4, 5 y 6 arriba – ejes 4 y 5 arriba

Ejes 4 y 5 autovirables – eje 4 autovirable – convencional
```

Estas relaciones revelan el particular efecto que tiene la modificación de la situación de cada uno de los ejes, sobre la respuesta dinámica del vehículo. De acuerdo con esto, elevar los dos o tres primeros ejes no afecta mayormente la amplificación de la zaga, lo que es equivalente a levantar el segundo eje y hacer autovirable al primero.

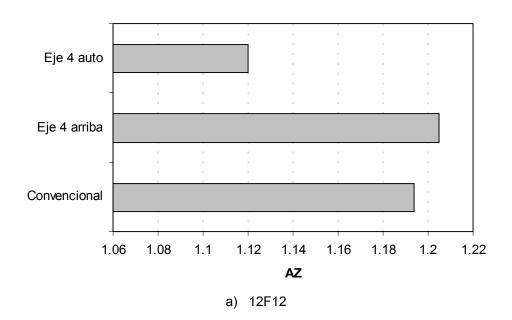
De la misma manera hacer los dos primeros ejes autovirables, o tan sólo el primero es equivalente; y ello a su vez es equivalente al vehículo convencional.

La figura 4.20 ilustra los resultados de la demanda de fricción a alta velocidad. Como se ha indicado en el Cap 2, esta medida de desempeño se vincula estrechamente con la manejabilidad del vehículo para seguir una trayectoria dada, o para sufrir un acodillamiento.

De acuerdo con estos resultados, para el vehículo 12F12 la menor demanda de fricción a alta velocidad se da en el caso del eje levantado; mientras que la peor situación se presenta en el caso del transporte convencional, equipado con ejes fijos. Introducir la cualidad de autovirabilidad para el vehículo mejora ligeramente la demanda de fricción.

En el caso del 12F1113, el rango de variación para la demanda de fricción a alta velocidad va de 0.11 a 0.145, aproximadamente. La menor demanda de fricción se presenta en el caso de los ejes levantados, pudiéndose los tres, o tan sólo el 4

o el 5. La condición de autovirabilidad de los ejes representa variaciones estrechas en los valores de esta demanda de fricción, identificándose claramente dos grupos de resultados, correspondientes a la inclusión o no de ejes autodireccionables.

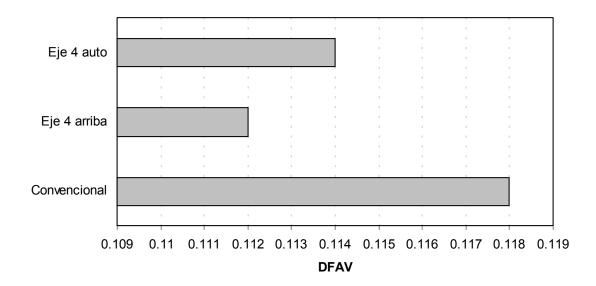


Eje 6 arriba, 4 y 5 - sen auto Eje 6 arriba y 4 - sen auto Ejes 5 y 6 arriba, 4 - sen auto Eje 5 arriba y 4 - sen auto Ejes 4, 5 y 6 - sen auto Ejes 4 y 5 - sen auto Eje 4 - sen auto Ejes 4, 5 y 6 levantados Ejes 4 y 5 levantados Eje 4 levantado Convencional 0.9 0.95 1.05 1 1.1 1.15 1.2 1.25 ΑZ

b) 12F1113

Figura 4.19.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre la AZ de dos vehículos de prueba, para pavimento perfecto y un cociente de amortiguamiento de 0.05 (Luo, 2005)



a) 12F12

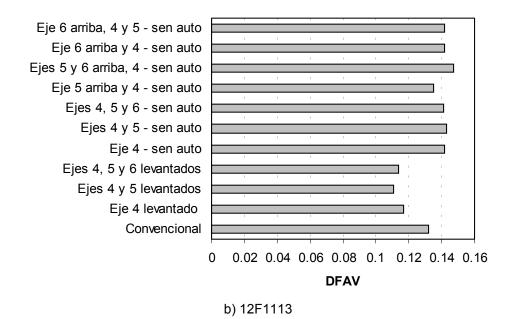


Figura 4.20.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre la DFAV de dos vehículos de prueba, para pavimento perfecto y un cociente de amortiguamiento de 0.05 (Luo, 2005)

La figura 4.21 presenta los resultados de los vehículos de referencia en lo que respecta a la demanda de fricción a baja velocidad. Estos resultados son esencialmente diferentes a lo que ocurre a alta velocidad. En el caso de la configuración 12F1113, el cambio de velocidad representa un cambio en el orden de magnitud de la fricción demandada, y para el 12F12 los valores permanecen en el mismo rango de magnitud.

Para el vehículo 12F12, la menor demanda de fricción a baja velocidad se obtiene al elevar el eje 4; mientras que el valor mayor se da en el caso del eje autovirable, siendo alrededor de tres veces el valor menor. Esta situación se desprende de la limitación del eje direccional para transmitir fuerza lateral.

En el caso del 12F1113, se presenta un importante incremento de la fricción demandada, alcanzando valores de 0.9 para la situación de elevar el eje 5, y hacer autovirable el 4. La menor demanda se observa al elevar los tres ejes (4 al 6). Con excepción de la situación obtenida al elevar el eje 5 y hacer autovirable el 4; la incorporación de ejes autovirables concentra los valores de esta demanda de fricción en un rango de 0.7 a 0.8.

Estos resultados reflejan la dicotomía de daño-beneficio acerca de la introducción de las diferentes variables tecnológicas. Sin embargo, la incorporación de ejes autovirables, a excepción de la combinación en la que se dispara el valor de la fricción demandada, no representa un cambio mayor respecto a la situación del transporte convencional.

#### Investigación de Coleman y Sweatman

Respecto a simulaciones del comportamiento de los vehículos a alta velocidad, Coleman y Sweatman (2002) reportan simulaciones del vehículo mostrado en la figura 4.22. Las variantes respectivas incluyen la direccionalidad del último de los ejes de la combinación, y la movilidad direccional del grupo completo de ejes.

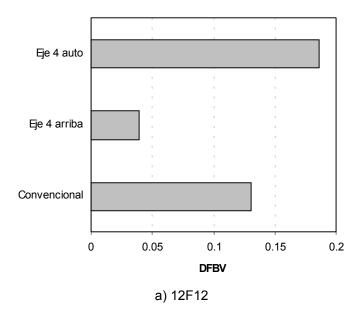
Los resultados se presentan, entonces, para las siguientes condiciones:

A 123 de ref

A 123 eje direccional

A 123 grupo de ejes direccional

Las partes de la figura 4.23 contienen los resultados de diferentes medidas de desempeño dinámicas: cociente de transferencia lateral de carga (*CTLC*); amplificación de la zaga (*AZ*); amortiguamiento direccional, despiste transitorio a alta velocidad (*DTAV*); barrido de la zaga (*BZ*); barrido frontal (*BF*); despiste a alta velocidad (*DAV*), y ancho total de barrido (*ATB*). Estos resultados tan sólo ejemplifican la multitud de productos de la investigación de Coleman y Sweatman.



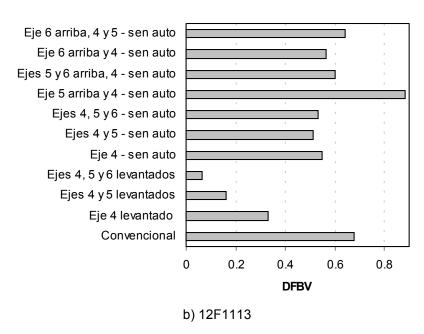


Figura 4.21.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre la DFBV de dos vehículos de prueba, para pavimento perfecto y un cociente de amortiguamiento de 0.05 (Luo, 2005)

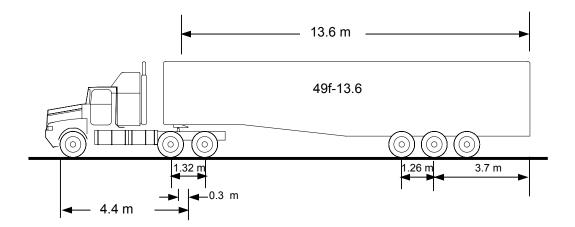


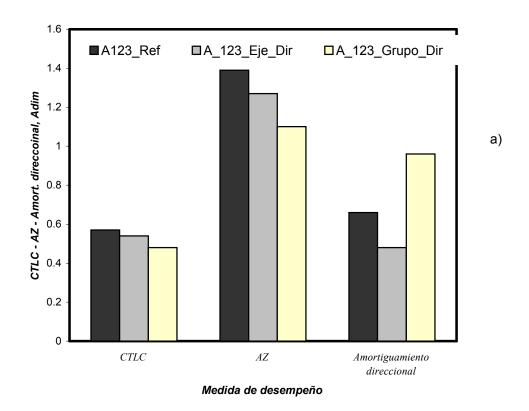
Figura 4.22 Equipo 49f-13.6

Los resultados en la parte a) de la figura 4.23 muestran lo siguiente:

- i. Que la transferencia de carga menor corresponde al grupo direccional de ejes
- ii. Que la menor amplificación de la zaga se obtiene con el grupo direccional de ejes
- iii. Que el mayor amortiguamiento de la oscilación direccional corresponde al grupo de ejes direccionales
- iv. Que la configuración de referencia es la que mayor respuesta presenta por cuanto a *CTLC y AZ*.

Los resultados en la sección b) muestran que el grupo de ejes direccional representa las menores respuestas dinámicas en cuanto a despiste; en tanto las mayores respuestas corresponden a los barridos delantero y de la zaga. Asimismo, que no existe una tendencia de cuál situación producirá las menores respuestas para las cuatro medidas de desempeño consideradas.

Por su parte, los resultados de la parte c), correspondientes al ancho total de barrido, indican que los menores anchos se pueden obtener en el caso del grupo direccional de ejes, mientras que el peor de los casos está representado por el vehículo en su situación de referencia. Sin embargo, el rango de variación para esta medida de desempeño no es grande, ya que varía de 7.1 m a 7.36 m.



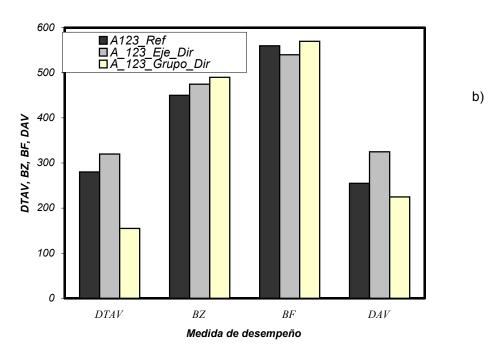


Figura 4.23.
Simulación del efecto del tipo de ejes direccionales sobre el desempeño dinámico del vehículo de la fig 4.22, equipado con distintos tipos de ejes direccionales. a) *CLC*, *FAZ* y amortiguamiento direccional; b) *DTAV*, *BZ*, *BF* y *DAV* 

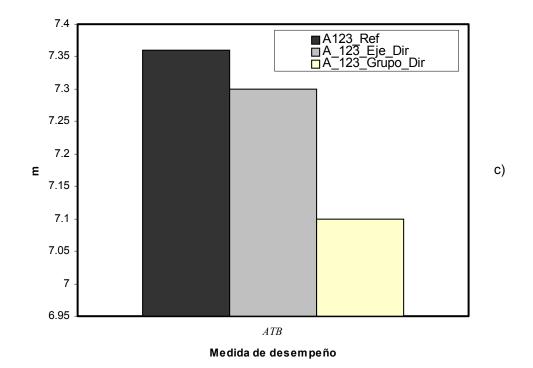


Figura 4.23.
Simulación del efecto del tipo de ejes direccionales sobre el desempeño dinámico del vehículo de la figura 4.22, equipado con distintos tipos de ejes direccionales. c) *ATB* 

Investigación de Jujnovich y Cebon

Se presenta ahora una discusión de resultados seleccionados del artículo de Jujnovich y Cebon (2002), quienes simularon el comportamiento del vehículo de la figura 4.8 bajo condiciones de alta velocidad. Los resultados están normalizados a la respuesta del vehículo base.

Las secciones a) a d) de la figura 4.24 ilustran respectivamente, las siguientes medidas de desempeño: amplificación de la zaga (AZ); despiste a alta velocidad en maniobra en círculo (o simplemente despiste a alta velocidad, DAV); cociente de transferencia lateral de carga (CTLC); y despiste transitorio a alta velocidad (DTAV). Las tres variantes consideradas en este estudio incluyen los ejes pivoteados o en tornamesa, la dirección comandada, y la autovirabilidad del eje. Estas variantes se comparan con la referencia de eje fijo. La parte a) de la figura mencionada revela que la menor amplificación de la zaga se obtiene para la configuración convencional, siendo la máxima amplificación de la zaga aquella de la suspensión pivotada o en tornamesa. Esta peor situación es un 30% mayor que la correspondiente a la condición convencional.

En lo que respecta a la sección b), en ella aparece lo relativo para evaluar el despiste a alta velocidad en círculo, la suspensión pivotada es equivalente al eje autovirable; mientras que comandar la dirección del eje es equivalente a contar con un eje fijo. En este caso, el máximo valor es menos de 15% mayor que la situación convencional.

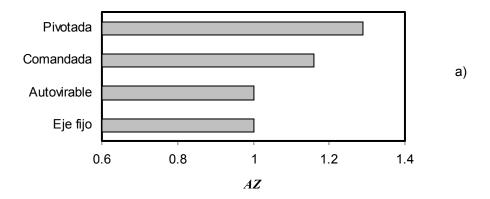
La transferencia lateral de carga se muestra en la parte c), dejando ver que la menor transferencia de carga corresponde a la configuración actual; mientras que la mayor se da en el caso de la suspensión pivotada. De esto se deduce que incorporar cualquier mecanismo direccional al eje promueve el incremento en la transferencia lateral de carga, de hasta un 40%, aproximadamente.

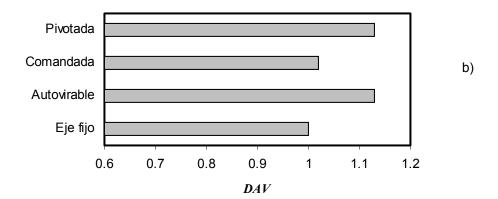
Finalmente, en la d) se muestra el despiste transitorio a alta velocidad, resultando que el mayor valor para este parámetro se obtiene para la suspensión pivotada, siendo hasta dos veces el valor del despiste para el vehículo de referencia. El eje autovirable y comandado arrojan resultados semejantes, del orden del 30% mayores a la respuesta del transporte convencional.

#### Investigación de Wu y Lin

En el contexto de la respuesta dinámica de vehículos articulados equipados con ejes direccionales en el semirremolque, Wu y Lin (2003) presentan un análisis teórico del desempeño de un vehículo articulado con un sistema de control direccional en el primero de los ejes. El sistema se basa en calibrar un ángulo de deslizamiento cero en el tractor, asignando una variación del ángulo del eje direccional del remolque en términos de la velocidad. Los resultados los presentan en términos de la respuesta en el tiempo de la velocidad de oscilación direccional (yaw); velocidad de deslizamiento lateral; posición lateral durante una maniobra de cambio de carril; y en función de la trayectoria descrita durante una vuelta de 90°.

La maniobra de cambio de carril se da en un esquema de lazo abierto, en el que se aplica al vehículo cierta historia de la posición del volante. Los resultados se presentan en la figura 4.25, los cuales revelan que darle un control direccional al eje del semirremolque, bajo el esquema de control propuesto por Wu y Lin, produce menor velocidad de oscilación direccional; así como un cambio de carril más compacto y un radio menor de curvatura durante la maniobra en régimen constante.





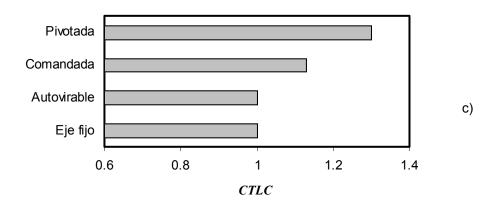


Figura 4.24.

Resultados de Jujnovich y Cebon, normalizados a la respuesta del vehículo convencional

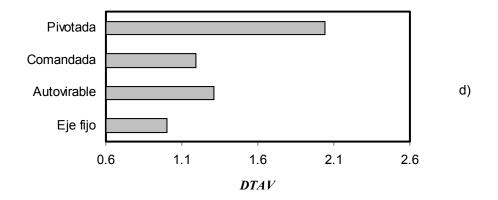


Figura 4.24.
Resultados de Jujnovich y Cebon, normalizados a la respuesta del vehículo convencional (cont)

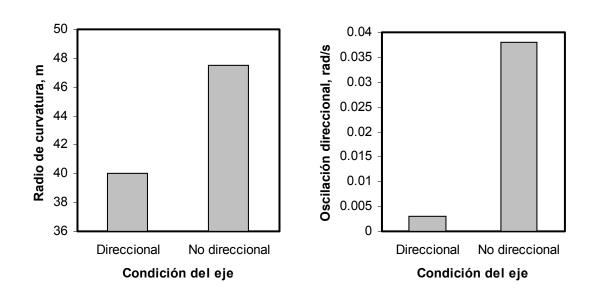


Figura 4.25.

Comparación del desempeño de un vehículo articulado con y sin eje direccional en la primera posición del semirremolque (maniobra de cambio de carril)( Wu y Lin, 2003)

#### Investigación en la Universidad de Laval

Los ensayos dinámicos llevados a cabo por Corbin, *et al* (1995) incluyeron pruebas dinámicas en combinaciones tractor-semirremolque equipadas con ejes autovirables, en los que los vehículos se dispusieron con ruedas exteriores para evitar la volcadura durante los ensayos (*out-riggers*).

La instrumentación consistió en acelerómetros, giróscopos y reóstatos, que permitieron la caracterización de la respuesta de las diferentes masas del vehículo a perturbaciones a alta velocidad. Una segunda "quinta rueda" se instaló para conocer de manera precisa la velocidad de avance de la unidad.

Se reporta en esa investigación que la respuesta en amplificación de la zaga de un semirremolque equipado con un eje autovirable delante de un tridem, fue menor que aquella de un vehículo semejante, con un eje fijo. Mientras que en el caso del eje del transporte con eje fijo, la *AZ* fue de 1.12; en el caso del equipo con eje virable resultó de 0.94.

#### Estudios en la Universidad de Michigan, UMTRI (Winkler, 1998)

Los resultados de Winkler muestran que para un vehículo no articulado, la adición de un eje autovirable en la última posición promueve un sobreviraje y por tanto una tendencia hacia la inestabilidad direccional. En el caso de una combinación tractor-semirremolque, se registra que este eje adicional promueve un despiste en estado permanente a tiempo que produce, aparentemente, una respuesta lenta del remolque al realizar maniobras transitorias. En todos los casos ensayados, un incremento de la carga en los ejes virables tendió a generar una degradación mayor en la calidad de manejo. La transferencia de carga en las llantas de los ejes fijos hacia los autovirables, por no ser éstos capaces de producir una fuerza lateral considerable, fue la razón fundamental para la pérdida de la calidad de manejo al usar ejes adicionales de avance libre (freely castering).

Winkler concluye que los efectos desestabilizadores encontrados, se derivan de la dirección en "avance libre" de los ejes, y no debido a la localización en la zaga extrema del eje direccional adicional. Se dice que de hecho la posición extrema del eje debería mejorar la estabilidad direccional de la combinación vehicular, pero que el libre avance de las ruedas es lo que hace que no se generen las fuerzas direccionales adicionales, necesarias para mantener la estabilidad direccional del automotor.

Se indica que el eje adicional podría todavía acrecentar la estabilidad del vehículo, siempre y cuando se mejorase la capacidad de desarrollar fuerzas laterales adicionales. Se reconoce que pudiera consistir en la incorporación de ejes virables de avance (*caster*), los cuales contasen con un mecanismo de retorno forzado a la posición neutra.

## 4.2.3 Comparaciones del efecto sobre el pavimento

Se presentan los resultados de Luo (2005) acerca del efecto potencial sobre los pavimentos debidos a la incorporación de ejes virables y retráctiles, considerando algunas de las medidas de desempeño reseñadas en el Cap 2. El análisis se circunscribe en esta revisión de la literatura, al efecto de la extensión o no del eje 4 en la combinación 12F12.

Las evaluaciones incluyen cuantificaciones del coeficiente de carga dinámica *CCD*, del factor de esfuerzo del camino *FEC*, y del esfuerzo dinámico agregado *EDA*.

Las otras referencias revisadas no incluyeron un efecto explícito de las diferentes configuraciones sobre el estado de deterioro del pavimento.

Se extraen del conjunto de resultados presentados por Luo, aquellos para cierto valor del cociente de amortiguamiento en las suspensiones (0.05), para distintos estados de rugosidad del pavimento (parejo o en buen estado, y rugoso o en mal estado).

La figura 4.26 muestra resultados selectos en cuanto al coeficiente de carga dinámica cuando se retrae o extiende el eje 4 de la combinación 12F12, revelando que salvo en el caso del eje-1 y pavimento parejo, este *CCD* es mayor cuando se tienen los ejes extendidos. La mayor variación de la elevación de dicho eje se observa en el *CCD* del eje 6 y pavimento rugoso.

Por su parte, la figura. 4.27 contiene los resultados del factor de esfuerzo en el camino, mostrando una gran variación de este parámetro al considerar extendido o retraído el eje 4 del vehículo. La mínima sensibilidad en el eje 1 se deriva de la poca variación en la carga del eje por efecto de elevar el eje número 4. El eje que mayor sensibilidad presenta a esta situación es el 6, cuyo valor de *FEC* aumenta más de dos veces por efecto de elevar el eje 4. No se observan diferencias significativas al pasar de un camino parejo a uno rugoso.

A su vez, la figura 4.28 representa la distribución espacial del esfuerzo dinámico agregado para los estados de pavimento parejo y rugoso, los cuales cuantifican el acrecentamiento del daño potencial de los vehículos sobre el pavimento al efectuar la elevación de uno de sus ejes. Estas importantes variaciones se atribuyen a las relaciones no lineales entre la carga de los ejes y el deterioro del camino.

Otra característica de respuesta del vehículo, asociada a su efecto potencial en el pavimento, puede ligarse al desarrollo de la máxima fuerza direccional, como se señaló en la sección correspondiente a la respuesta a baja velocidad del vehículo.

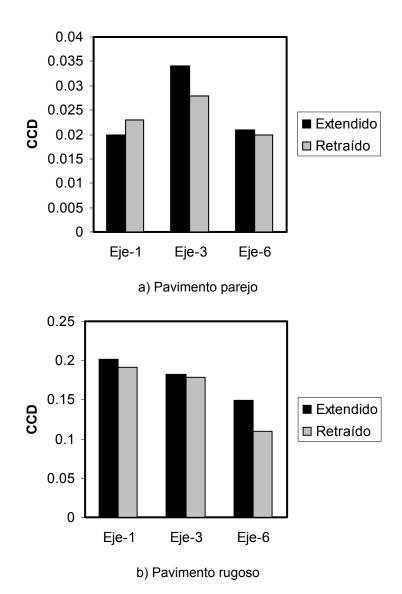
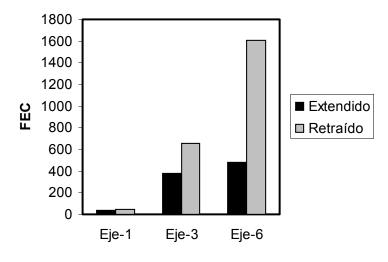
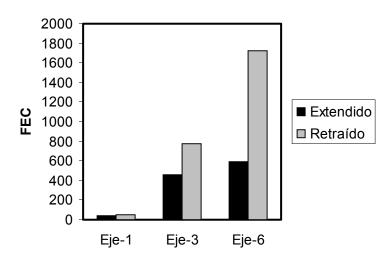


Figura 4.26.
Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre el *CCD* para dos condiciones del eje 4 del vehículo de prueba. a) Pavimento parejo; b) Pavimento rugoso



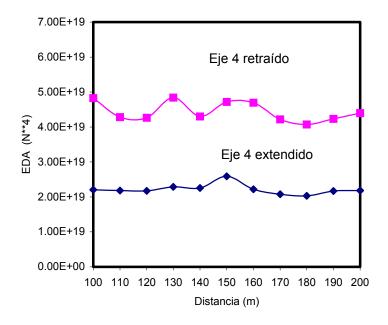
a) Pavimento parejo



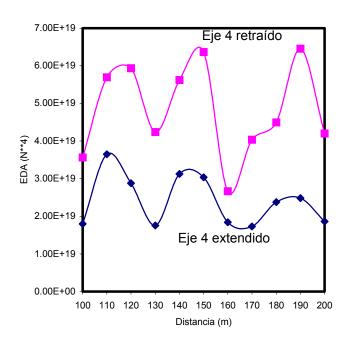
b) Pavimento rugoso

Figura 4.27.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre el factor de esfuerzo del camino para dos situaciones del eje 4 del vehículo de prueba. a) Pavimento parejo; b) Pavimento rugoso



a) pavimento parejo



b) pavimento rugoso

Figura 4.28.

Efecto de la condición de los ejes autovirables sobre el esfuerzo dinámico agregado para dos situaciones del eje 4 del vehículo de prueba. a) Pavimento parejo; b)

Pavimento rugoso

## 4.2.4 Diagrama de manejo

De los documentos revisados, sólo Jujnovich y Cebon (2002) emplean los diagramas de manejo como parte de la evaluación del desempeño de vehículos articulados equipados con ejes direccionales, limitando su análisis al de la figura 4.8, consistente en un eje direccional montado en la última posición del tridem de un semirremolque. Estos resultados se reproducen en la figura 4.29, los cuales revelan un incremento en la aceleración para un sobreviraje como resultado de la incorporación del eje direccional. El aumento en la aceleración para el sobreviraje se da en el siguiente orden: eje comandado, eje en tornamesa o pivotado, y eje autovirable.

De esta manera se deduce un beneficio directo, derivado del uso de un eje direccional en el semirremolque.

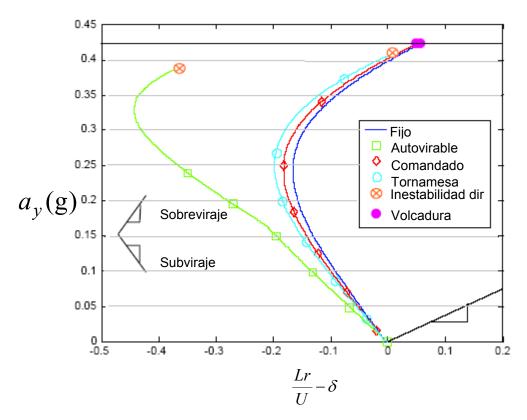


Figura 4.29.

Diagrama de manejo de un tractor-semirremolque equipado con diferentes tipos de eje direccional en la ultima posición (Jujnovich y Cebon, 2002)

## 4.2.5 Estabilidad lateral estática (*ELE*)

El efecto de los ejes autovirables sobre los umbrales de volcadura de las diferentes combinaciones vehiculares fue estudiado en diversas referencias, estableciéndose en general variaciones pequeñas de la estabilidad lateral estática como resultado de la incorporación de tales ejes virables.

Jujnovich y Cebon (2002) reportan un efecto nulo de la incorporación de un eje virable en la combinación vehicular simple simulada, con valores idénticos de 0.42 g.

La figura 4.30 ejemplifica los resultados de Billing (2003) para el vehículo compuesto de tres ejes en el tractor, y cinco ejes en el semirremolque (dos sencillos y un tridem), como una función de la posición del eje y de la altura del centro de gravedad. Estos resultados revelan que la posición del eje retráctil puede influenciar el comportamiento estático del vehículo en aproximadamente el 10%, sin importar la posición del centro de gravedad de la carga del transporte.

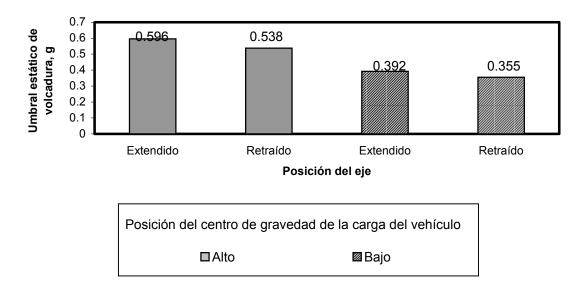


Figura 4.30.
Resultados de la estabilidad estática del vehículo, tipo 12S113 (Billing, 2003)

Corbis *et al.* (1995) manifiestan ensayes en plataformas inclinables (*tilt tables*) para medir la estabilidad lateral estática de los vehículos (figura 4.31). Se observa que un eje retráctil convencional puede representar incrementos o decrementos en esta medida de desempeño, como una función de la configuración ensayada. Esto es, un eje retráctil en la configuración **A** incrementa ligeramente el umbral estático (de 0.44 a 0.45), mientras que para la configuración **C**, lo disminuye fuertemente (de 0.3 a 0.26).

Como se listó en la tabla 4.1, el vehículo **A** está equipado con suspensiones de aire, mientras que la configuración **C** es con suspensiones de hojas. Sin embargo, los autores aclaran que la fuerte variación del umbral de volcadura para la configuración **C**, obedece a que en el chasis se realizaron algunas modificaciones para alojar al eje autovirable.

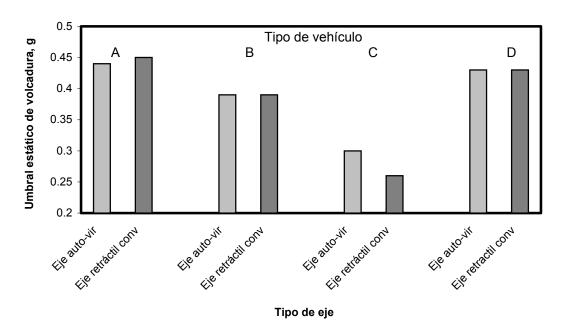


Figura 4.31. Ensayos estáticos de la estabilidad de los vehículos tipo A, B, C y D (Corbis, et al, 1995)(Tabla 4.1)

La figura 4.32 ilustra los resultados de evaluaciones del desempeño estático de uno de los vehículos considerados por Coleman y Sweatman (2002), destacando que el umbral de volcadura se ve afectado por las variaciones hechas al transporte base A123.

Estos cambios se refieren a la consideración de una mayor capacidad volumétrica de carga, y al uso de ejes direccionales y de grupos de ejes direccionales. Las reducciones en estos umbrales de volcadura, son del orden del 7 % como máximo.

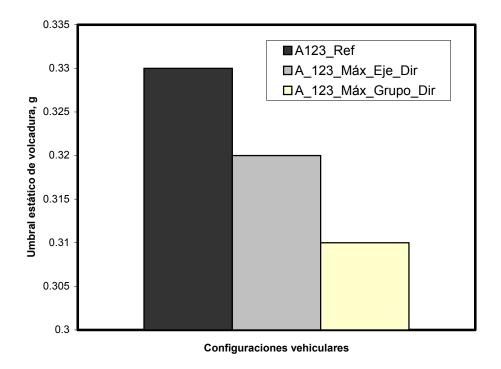


Figura 4.32.
Simulación del efecto del tipo de ejes direccionales sobre el desempeño estático del vehículo A123, y sus alteraciones

Luo (2005) señala los umbrales estáticos de volcadura como una función de los ejes empleados, de la rugosidad del pavimento y de la relación de amortiguamiento.

La figura 4.33 ejemplifica los resultados para el caso del vehículo 12F12, mismos que revelan que la rugosidad del pavimento ocasiona una disminución del umbral de volcadura, independientemente del tipo de eje 4 con que cuente la unidad. En general, sin embargo, conducir con ese eje retraído provoca una disminución notable del umbral de volcadura, mientras que el eje sencillo autovirable favorece la estabilidad estática de los transportes.

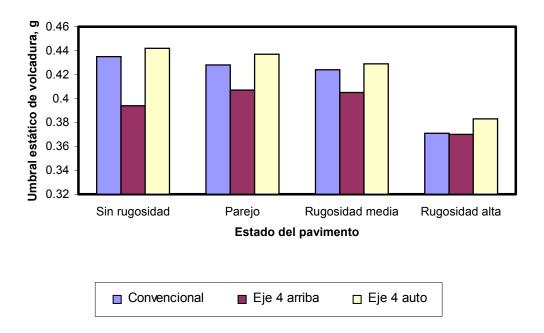


Figura 4.33.
Simulación del efecto del tipo de ejes direccionales sobre el desempeño estático del vehículo 12F12 (Luo, 2005)

## 4.2.6 Beneficios potenciales en productividad y seguridad

Tomando en cuenta el sistema de transporte carretero de un país, los incrementos potenciales en la productividad, derivados del uso de camiones equipados con ejes virables, se proponen como resultado de lo siguiente:

- i. Aumento de la capacidad volumétrica de los transportes al poderse incrementar las longitudes de los vehículos, sin alterar su desempeño seguro
- ii. Incremento del número de ejes, que conlleva una mayor capacidad de carga
- iii. Ahorros de combustible debido a la menor resistencia al movimiento en curva
- iv. Ahorros en desgaste de las llantas por el menor deslizamiento llantapavimento
- v. Disminución del deterioro de las carreteras por la disminución de los esfuerzos tangenciales llanta-pavimento

Como efecto directo de una mayor capacidad de carga en los transportes pesados se identifica un menor número de ellos en las redes carreteras, con lo que Coleman y Sweatman (2002) sugieren una mejor seguridad vial. Estos investigadores son quienes con más profundidad han abordado el tema de la productividad de camiones equipados con ejes virables en las unidades remolcadas, encontrando que las ganancias en productividad (definida como el cociente de los productos entre los insumos), puede variar desde un 8% en el caso de vehículos doblemente articulados, hasta el 33 % en los no articulados. Los tractor-semirremolque se ubican en el rango del 9% en cuanto a incrementos en la productividad.

Para una inversión en ejes virables del orden de los 7000 dólares, se sugiere que el aumento de productividad anual podría ubicarse en 18000 dólares. Sin embargo, se señala que la oferta incrementada de manejo de carga, derivada del uso de ejes virables podría deteriorar el porcentaje de empleo de camiones, con lo que el impacto en la productividad se vería afectado.

De manera importante, Coleman y Sweatman (2002) señalan que las modificaciones en los vehículos simulados, involucrarían cambios en su desempeño, aunque sin dejar de considerar que dichos cambios caerían en general dentro de un desempeño seguro aceptable. En particular, estos autores encuentran que el uso de ejes cuádruples en combinaciones tractor-semirremolque, podría representar un incremento notable de productividad, incluso en el caso de autotanques.

### Ahorros potenciales en el desgaste en llantas y combustible

En los diferentes reportes revisados no se encontró información numérica sobre la disminución potencial del desgaste de las llantas y ahorro de combustible. Sin embargo, la empresa BPW, fabricante de ejes autovirables en Europa, reporta los siguientes importantes ahorros (BPW, 2005):

60 % de ahorro de combustible al maniobrar en curva

10 % de ahorro de combustible de manera global

Prolongaciones en la vida de las llantas, del orden del 50 % en el caso de las llantas delanteras

Prolongaciones en la vida de las llantas, del orden del 70 % en el caso de las llantas traseras de los remolques

## Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se ha presentado una descripción y análisis de las metodologías empleadas, y resultados alcanzados, con relación al uso de ejes virables en combinaciones vehiculares.

Se han tomado en cuenta aspectos definidos de la incorporación de ejes virables en las composiciones vehiculares, dejando de lado los algoritmos de control de las unidades equipadas con direcciones activas que, debe decirse, es un tema que recibe mucha atención en la actualidad en Inglaterra y Estados Unidos.

Los estudios revisados consistieron de reportes elaborados para instituciones gubernamentales; algunos artículos de congresos y de *journals*; y una tesis de maestría.

Se identificaron diferentes grupos de trabajo sobre los ejes virables en el mundo, agrupándolos en Australia y Asia, Inglaterra, Canadá y Estados Unidos. A nivel nacional no se encontraron investigaciones acerca de la incorporación de ejes virables en las combinaciones vehiculares pesadas.

Mientras que las metodologías revisadas consisten esencialmente en la aplicación de modelos matemáticos para tales estudios, los resultados de dichas metodologías incluyen una variedad de medidas de desempeño, agrupadas como aspectos geométricos a alta y baja velocidad; estabilidad lateral estática y dinámica; estabilidad direccional; y efecto de las combinaciones así equipadas sobre el estado de deterioro de las infraestructuras. Se han descrito estas diversas medidas de desempeño en cuanto a sus variantes conceptuales, de acuerdo con distintas referencias.

Las medidas de desempeño empleadas por los diversos autores no han sido usadas de manera consistente por todos ellos, denotando intereses particulares durante los estudios. De esta manera, se pueden identificar estudios "viciados" hacia la caracterización de los efectos de esas tecnologías sobre el estado de deterioro de los pavimentos. Asimismo, algunos otros que se concentran en las medidas de desempeño dinámicas. En particular, existen discrepancias respecto a la utilidad de los diagramas de manejo, por lo que tal medida de desempeño se ha usado de manera marginal.

Las medidas de desempeño que inequívocamente son atendidas por los diversos autores, consisten en el desempeño a alta velocidad de los vehículos. En particular, el despiste a alta velocidad durante una maniobra en estado permanente, y otra en una maniobra de rebase.

Otra medida de desempeño que se emplea de manera consistente es la estabilidad lateral estática.

Los trabajos en la Universidad de Concordia acusan ciertos rasgos particulares interesantes, como es la incorporación del amortiguamiento de las suspensiones de los ejes virables, aparte de tomar en cuenta el estado de las infraestructuras en cuanto a su rugosidad. Sin embargo, las investigaciones ahí realizadas, mismas que se concentran de manera fundamental en los aspectos del deterioro de los pavimentos, carecen de una medida de desempeño que tome en cuenta la respuesta del pavimento, aparte de no incluir los efectos de las fuerzas tangenciales llanta-pavimento, mismas que implican una diferencia notable al comparar vehículos provistos o no de ejes direccionables. Asimismo, no considera tal estudio el efecto espacial sobre la superficie del pavimento. Esto es, no toma en cuenta que la aproximación de trayectorias entre los ejes del tractor y remolques, ligada a la utilización de ejes virables, representa una concentración de las fuerzas de los vehículos sobre una franja menos amplia de pavimento.

Por su parte, otros estudios en Canadá se han encauzado a modelar y ensayar tales esquemas tecnológicos, en la perspectiva de sustituir ejes retráctiles por autovirables, como resultado del abuso de tales ejes en las infraestructuras locales, y los onerosos efectos sobre los pavimentos.

Los estudios revisados dejan ver las ventajas y desventajas de la incorporación de los ejes virables respecto a la seguridad vial. De esta manera, mientras que las ganancias por el ancho total de barrido se dan en un rango de unos cuantos puntos porcentuales, como resultado de la adición de ejes virables; otras medidas de desempeño, básicamente el barrido de la zaga, exhibe incrementos notables asociados a este tipo de ejes.

Sin embargo, de acuerdo con la mayoría de las fuentes, la incorporación de ejes virables representa mejoras globales en el desempeño vial de los vehículos, significando además, un notable beneficio en la productividad, del orden del 25 %.

De manera especial se tienen los impactos del uso de ejes virables en los valores de desempeño energético de los vehículos, y en el deterioro de las llantas. Una referencia que debe tomarse con cautela al perseguir ella un fin comercial indica ahorros globales del 10 % en el consumo de combustible, y prolongaciones en la vida de las llantas del orden del 30 %, como resultado de los ejes virables,

La aplicación de los ejes virables en las combinaciones vehiculares en México se vislumbra como necesaria ante las restricciones de diseño de muchas de las carreteras nacionales. La promoción para el uso de estos ejes se estima conveniente en el caso de combinaciones tractor-semirremolque, en donde un eje adicional delante de un tándem, podría representar beneficios productivos y con respecto a la seguridad vial. Imagínese, por ejemplo, las ventajas potenciales de emplear estos transportes en tramos tales como la carretera Palmillas-Pachuca.

Esta infraestructura se caracteriza por su trazo segmentalmente sinuoso, de gran uso por combinaciones vehiculares del tipo T3S3. Sin embargo, tal esquema deberá sustentarse en aproximaciones teóricas y de campo (testimoniales).

## Recomendaciones

A la luz de los esquemas reportados en la literatura, se identifica la necesidad de llevar a cabo las siguientes actividades de investigación:

A. Modelado teórico-experimental del efecto de los vehículos en los pavimentos, y consumo de combustible

Al respecto, es conveniente tomar en cuenta dos fenómenos. Por un lado, se requiere cuantificar el resultado de la concentración de las cargas en la superficie de pavimento, asociada a los menores despistes de los ejes virables.

Por otro lado, tomar en cuenta los esfuerzos tangenciales entre la llanta y el pavimento, mismos que serían reducidos sustancialmente por efecto de los ejes virables. Para ello se recomienda un modelo de pavimento que tome en cuenta la respuesta de éste en cuanto a los esfuerzos tangenciales y normales. En particular, ampliar el alcance del modelo energético descrito en este trabajo, sin modificar su naturaleza.

La modelación matemática acerca de los desgastes de las llantas y consumo de combustible podría basarse, por un lado en una aproximación energética viscoleástica en cuanto a las llantas. Por otro lado, con respecto a los consumos de combustible, se podrían elaborar modelos paramétricos que empleen valores empíricos en cuanto a los coeficientes de resistencia a la rodadura de los diferentes ejes.

En cuanto al aspecto experimental de esta recomendación se podrían emplear modelos a escala, desarrollando una instalación en la que se puedan ensayar diferentes tipos de ejes. Tal instalación se asemejaría a las pistas circulares empleadas en los laboratorios de vías terrestres (Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería de la UNAM). En esta instalación a escala, se podrían medir los efectos globales de los ejes direccionales en el desgaste de las llantas y el consumo de combustible. El mecanismo motriz de la configuración móvil resultante podría equiparse con transductores de fuerza que permitieran caracterizar las fuerzas de tiro, como una función del tipo de eje dispuesto en el vehículo. Asimismo, se requeriría instrumentar los bastidores de los vehículos arrastrados con respecto a los niveles de esfuerzo en sus elementos estructurales.

Estos equipamientos permitirían extrapolar resultados a los vehículos de dimensiones reales, y predecir así los desempeños en tales casos.

B) Modelado teórico-experimental del desempeño dinámico de los vehículos durante maniobras de emergencia

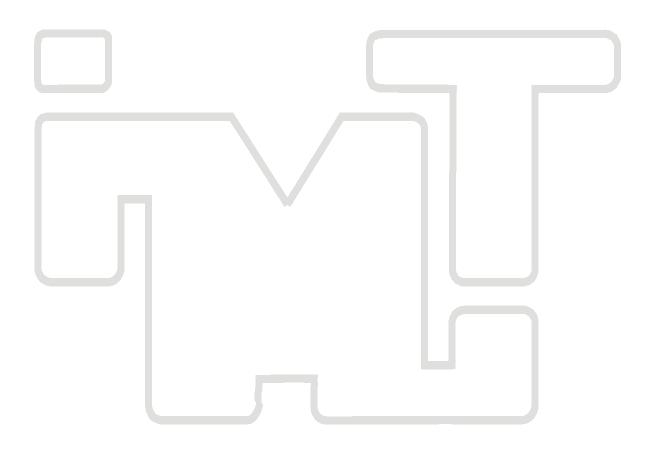
Como se ha comprobado en este trabajo, no se ha desarrollado aún un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de las diferentes configuraciones durante maniobras de emergencia, tales como el frenado en curva.

Un esfuerzo orientado a obtener tal modelo matemático resulta básico para evaluar y desarrollar a los ejes virables, sobretodo al incorporar sistemas de control de la orientación de tales ejes. Para tal fin, se identifica partir del modelo yaw-roll existente, al que habría que incorporar las entradas de aceleración longitudinales, o bien desarrollar el modelo necesario a partir de algunas aproximaciones realizadas en el IMT.

## Referencias

- Billing, J R y Patten, J D. "Performance of Infrastructure-friendly Vehicles", Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council of Canada, Technical Report CSTT-HVC-TR-058 (2003).
- Billing, J R y Patten, J D. "Full Scale Performance Testing of 5-axle Semitrailers", Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council of Canada, Technical Report CSTT-HVC-TR-084 (2004).
- BPW "LL self-steering axle" <u>www.hkta.com/bpw/index.html</u>, fecha de consulta: marzo (2005).
- Cebon, D. "Handbook of Vehicle-road Interaction', Engineering Department, Cambridge University, England, ISBN 90 265 1554 5 (1991).
- Coleman, B y Sweatman, P. "Steerable Axles to Improve Productivity and Access", Final report, National Road Transport Commission, ISBN 1 877093 20 3 (2002).
- Collop, A C. Effects of Traffic and Temperature on Flexible Pavement Wear. Tesis Doctoral. Universidad de Cambridge (1993).
- Corbin, G, Grandbois, J, y Richards, M J. "Evaluation de L'essies Autovireur Utilisé sus une Semi-remorque" Proceedings of the Fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Ann Arbor, Jun 25-29, 1995 (1995).
- CVDC Cambridge Vehicle Dynamics Consortium http://www.cvdc.org/projects. html, fecha de consulta: marzo 2005 (2005).
- El-Gindy, M. "An Overview of Performance Measures for Heavy Commercial Vehicles in North America", *Int Journal of Vehicle Design*, Vol 16, Nos 4/5 (1995).
- El-Gindy, M. "Dynamic Behaviour of a Tractor/Quadaxle Trailer with Variable Length Drawbar", *Int Journal of Vehicle Design*, Vol12, No 6 (1991).
- ETC. "Transit Coach Operating Duty Cycle (BAC)" Diesel Net <a href="http://www.dieselnet.com/standards/cycles/bac.html">http://www.dieselnet.com/standards/cycles/bac.html</a>, fecha de consulta: marzo (2005).
- FHWA. *Bridge Formula Weights*, Department of Transport, Federal Highway Administration (1985).
- HRB. "The AASHO Road Test", Special report 73, National Academy of Sciences, Highway Research Board, NRC (1962).
- Jujnovich, B y Cebon, D. "Comparative Performance of Semitrailer Steering Systems", 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions, Delft, The Netherlands, Europe, Jun 16 20 (2002).
- LeBlanc, P A, El-Gindy, M. "Directional Stability of a Straight Truck Equipped with a Self-steering Axle", *Int Journal of Vehicle Design*, Vol 13, No 5-6 (1992).
- LeBlanc, P A, El-Gindy M, y Woodrooffe, J H F. "Self-steering Axles: Theory and Practice", SAE Paper No 891633 (1989)

- Luo, S. "Relative Performance Analyses of Articulated Vehicles with Multiple Conventional, Liftable and Self-steering Axles", Tesis de Maestría, Universidad de Concordia, Escuela de Estudios de Posgrado (2005).
- McCullough, G J. "Trucking Efficiency versus Transportation` Efficiency: An Economic Evaluation of TRB Special report 267", TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM (2003).
- NRTC. "Initial performance standards from NRTC" http://www.ntc.gov.au/filemedia/Reports/PerformanceCharacteristicstheAus251.doc, fecha de la consulta: marzo 11 (2005).
- Raj, R I S. "Influence of Road Roughness and Directional Maneuver on the Dynamic Performance of Heavy Vehicles', *Ms Sc Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Concordia University, Montreal, Canada (1998).
- Romero, J A y Lozano, A. "Study of Road Damage Potentials of Mixed Traffic" International Forum for Road Transport Technology, 6<sup>th</sup> International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Jun 18-22, 2000. Saskatoon, Saskatchewan, Canada (2000A).
- Romero, J A y Lozano, A. "A Simulation Methodology for Analysis of Vehicles Pavement Interactions in a Real Traffic Environment", International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov 5-10, 2000. Orlando, Flo (2000B).
- Romero, J A, Lozano A, Rakheja, S, Ahmed, A K W, y Martínez, M. "Influencia de la Rugosidad de los Pavimentos sobre la Estabilidad Direccional de los Vehículos Pesados", Publicación Técnica 157, IMT (2001).
- Ratzilla, "Tail Swing" <a href="http://www.ratzilla.com/bus/tail\_swing.htm">http://www.ratzilla.com/bus/tail\_swing.htm</a>, fecha de consulta: marzo 2005 (2005).
- Sankar S, Rakheja S y Piche, A. "Directional Dynamics of a Tractor-Semitrailer with Self- and Force-steering Axles", SAE Transactions, SAE 912686 (1991).
- Schade, W y Rothengatter, W. "Improving the Assessment of Transport Policies by Dynamic Cost-benefit-analysis; Interim Results of the IASON Project for the European Commission", *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM* (2003).
- Torres, G. "Criterios que intervienen en las metodología de evaluación económica de rehabilitación de caminos rurales", Publicación Técnica del IMT, Número 147, Instituto Mexicano del Transporte (2000).
- Winkler, C B. "Innovative Dollies: Improving the Dynamic Performance of Multi-trailer Vehicles" UMTRI (1986).
- Winkler, C B. "The Influence of Rear Mounted Caster-Steered Axles on the Yaw Performance of Commercial Heavy Vehicles" UMTRI (1998).
- Woodrooffe, J H F, LeBlanc, P A y El-Gindy, M. "Technical Analysis and Recommended Practice for the Double-drawbar Dolly using Self Steering Axles" NRC Technical Report, No. DM-010. The Roads and Transportation Association of Canada (1989a).
- Woodrooffe, J H, LeBlanc, P A y El-Gindy, M. "Self-steering Axles and the Commercial Vehicle". The Third International IRTENZ Seminar, Christchurch, August 1-3 (1989b).
- Wu, D H y Lin, J H. "Analysis of Dynamic Lateral Response for a Multi-axlesteering Tractor and Trailer" *Heavy Vehicle Systems*, A special Issue of the *Int J of Vehicle Design*, Vol 10, No 4 (2003).



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)

§ Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)

### CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683 Col San Juan Mixcoac 03730, México, D F tel (55) 5598-5610 fax (55) 55 98 64 57

#### **SANFANDILA**

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

www.imt.mx publicaciones@imt.mx