REPORTE TÉCNICO

Sanfandila, Qro. 29 de Enero de 2003

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SCT

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

COORDINACIÓN DE EQUIPAMIENTO PARA EL TRANSPORTE

ET-078-04: "Estudio comparativo del comportamiento de una llanta supersencilla con llantas duales convencionales"

No. de reporte: 036

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Km. 12 Carretera Querétaro - Galindo
C.P. 76700 Sanfandila, Pedro Escobedo, Qro.
Tel. 01 (442) 216 9777, 216 9744
Fax 01 (442) 216 9671

Preparado para: **INDUSTRIAS MICHELIN, S. A. DE C. V.**

Elaboró:

HOJA NO VÁLIDA SIN FIRMA

_____
Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Encargado del Área de Dinámica Vehicular

Aprobó	**Vo. Bo.**
HOJA NO VÁLIDA SIN FIRMA	**HOJA NO VÁLIDA SIN FIRMA**
DR. MIGUEL MARTÍNEZ MADRID Coordinador de Equipamiento para el Transporte	DR. OCTAVIO RASCÓN CHAVEZ Director General Instituto Mexicano del Transporte

ORIGINAL ☐

NÚMERO DE COPIA ☐

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

PARTICIPANTES:

En el desarrollo de las actividades que dan origen a este reporte, así como en su elaboración, participaron los siguientes investigadores:

Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos

M. C. David Vázquez Vega

Dr. Miguel Martínez Madrid

Ing. Carlos Adrián Favela Gallegos

Ing. Pablo Rodrigo Orozco Orozco

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

CONTENIDO

Página

Resumen 5

Introducción 6

1 Antecedentes 8

2 Alcances del estudio 8

3 Objetivo 9

4 Descripción general de la metodología 9

5 Aspectos técnicos considerados 10

5.1 Generalidades 10

5.2 Designación de las llantas 11

5.3 Esquemas de comparación 11

5.4 Aspectos de simulación 12

5.5 Aspectos experimentales 13

6 Resultados 15

6.1 Resultados teórico-numéricos 15

6.2 Resultados experimentales 23

Conclusiones 28

Referencias 29

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

RESUMEN

En este estudio se presenta una evaluación comparativa del comportamiento mecánico de llantas Michelin del tipo supersencilla XOne, con respecto al arreglo dual de llantas Michelin sencillas empleadas en vehículos de carga pesada. El estudio se apoya en la simulación del movimiento de un vehículo articulado clasificado como T3S2 (tractocamión-semirremolque) sujeto a un par de maniobras direccionales, así como en pruebas experimentales generales de estabilidad y de frenado con llantas 455/55R22.5 XOne XDA-HT y XOne XTE* y con llantas 11R22.5 XDA-HT y XZE. De la simulación se analiza el efecto del tipo de llanta en el comportamiento dinámico del vehículo, principalmente sobre la respuesta direccional. La evaluación experimental considera el comportamiento del vehículo durante la pérdida súbita de presión de las llantas de un lado del semirremolque, así como la distancia de frenado sobre pavimento mojado. Tanto los resultados de la simulación, como los resultados experimentales, muestran en general que la diferencia en el área de contacto es del 15% menor en la llanta XOne que en el arreglo dual. Además, los modelos involucrados en el estudio, tanto de llanta supersencilla como de llantas sencillas en arreglo dual, tienen un comportamiento dinámico similar, proporcionando la llanta supersencilla una mayor estabilidad direccional y un menor peso por conjunto de llantas.

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

INTRODUCCIÓN

Las llantas neumáticas son los elementos con los cuales los vehículos de autotransporte interactúan directamente con el camino. Gracias a esta interacción, el vehículo puede desplazarse, acelerarse y detenerse sobre la superficie de las carreteras, brindando soporte para la carga y el mismo vehículo, amortiguando las vibraciones debidas a la rugosidad del camino y proporcionando el control direccional para seguir la trayectoria requerida. Estas funciones permiten a las llantas tener un efecto importante en el comportamiento dinámico global de los vehículos de carretera.

Desde su origen, alrededor del año 1888, hasta la actualidad, la llanta neumática ha sufrido continuas modificaciones en cuanto a forma, estructura, constitución, construcción y materiales.

Los vehículos y las llantas siempre han sido dependientes unos de otras, estableciendo una relación tan estrecha que, con el paso del tiempo, ha promovido el desarrollo tanto de los vehículos como la evolución de las llantas. De esta manera, las innovaciones aplicadas, consideran el efecto mutuo en los distintos aspectos para mejorar la operación, la estabilidad y la seguridad del transporte terrestre.

Debido a las magnitudes de carga y a los requerimientos de tracción, los vehículos de carga pesada, utilizan tradicionalmente arreglos duales de llantas sencillas (Figura 1), exceptuando el eje direccional. Esta condición dual implica el uso de dos llantas por cada lado del eje, cuyo propósito es tener una mejor distribución de la carga por llanta y una mayor área de contacto con el camino, facilitando tanto el arrastre de la carga transportada como el frenado del vehículo.

Figura 1. Combinación de llantas sencillas convencionales en un arreglo dual.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Tomando en consideración el mejoramiento de diversos aspectos operativos de los vehículos como la tracción, el soporte de la carga y la transmisión de esfuerzos al pavimento, la empresa Michelin desarrolló un nuevo diseño de llanta para vehículos de carga pesada, capaz de reemplazar las llantas duales empleadas en los ejes tractivos y de carga. Dentro de las innovaciones tecnológicas involucradas en el nuevo diseño, denominada llanta “supersencilla”, destaca la geometría, mostrando un mayor ancho y una menor relación entre la altura y el ancho de la sección transversal, comparada con una llanta convencional (Figura 2). Esta llanta, que conserva el diámetro nominal para el montaje sobre el rin, requiere de un rin compatible con el ancho de la llanta, que una vez colocada sobre el vehículo, ocupa un menor espacio transversal. De acuerdo al fabricante, las características dimensionales de esta llanta ofrecen un área de contacto con el piso semejante a la generada por el conjunto de llantas en un dual; mientras que su construcción le brinda características de desempeño semejantes a las llantas duales. Además, según Michelin, proporciona una mejor estabilidad direccional ante eventos que involucren la pérdida o falla repentina de una de estas llantas en un vehículo de carga.

Figura 2. Llanta supersencilla (izquierda) y llanta sencilla típica (derecha).

En este reporte se presentan, de una manera comparativa, los resultados obtenidos de un estudio en el que se evalúa el efecto del uso de llantas Michelin sencillas en arreglo dual y llantas Michelin supersencillas XOne, modelando su empleo en un vehículo articulado de carga T3S2. El estudio se apoya en la simulación del movimiento de este vehículo, sometido a una maniobra de cambio de carril y a una maniobra de dirección tipo “rampa”. La comparación se apoya también en resultados experimentales para medir el efecto que tiene sobre la estabilidad direccional, la pérdida repentina de presión de las llantas de carga sencillas 11R22.5 XZE en arreglo dual o supersencillas 455/55R22.5 XTE*, montadas en los ejes de un semirremolque. El semirremolque forma parte de una configuración T3S2, siendo halado por un tractocamión cuyas llantas montadas en sus ejes tractivos son 11R22.5 XHA-HT o 455/55R22.5 XOne XDA-HT, respectivamente en cada caso.

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

1 ANTECEDENTES

Con el propósito de introducir al mercado mexicano la llanta "*Super Single X-One*" del tipo de llantas supersencillas desarrolladas por la empresa *Michelin North America Inc*., Industrias Michelin, S. A. de C. V. solicitó al Instituto Mexicano del Transporte (IMT), se aplicara una serie de pruebas a la llanta mencionada. El propósito de estas pruebas, sería el de proveer información técnica sustentable sobre el desempeño de las llantas supersencillas. Así, con base en esta información, las autoridades competentes pudieran establecer criterios de decisión para dictaminar el uso de este tipo de llanta, como una alternativa de sustitución de arreglos de llantas duales en vehículos de carga pesada. Lo anterior, de acuerdo a los lineamientos indicados en las normas y reglamentos relativos a los vehículos que circulen sobre la Red Federal de Carreteras.

En respuesta a esta solicitud, atendiendo la complejidad del comportamiento estático y dinámico que presentan las llantas neumáticas, el IMT presentó una propuesta de estudio comparativo. El objetivo planteado fue el de proporcionar las principales características entre el desempeño de la llanta supersencilla y arreglos duales de llantas sencillas de tipos usualmente utilizados.

Dentro de sus generalidades, esa propuesta hace referencia al uso de herramientas de simulación teórica-numérica, así como a resultados derivados de pruebas de desempeño en pista. La simulación se basa en la respuesta en el comportamiento dinámico de un vehículo genérico de carga pesada, en los casos de utilizar en los ejes de carga y tracción llantas sencillas en el común arreglo dual o llantas supersencillas. Similarmente, las pruebas experimentales se enfocan principalmente a comparar la estabilidad direccional de un vehículo con llantas supersencillas, con respecto al mismo vehículo acondicionado con llantas sencillas en arreglo dual.

2 ALCANCES DEL ESTUDIO

El presente estudio proporciona únicamente resultados comparativos entre la llanta Michelin tipo Super Single XOne 455/55R22.5 en los modelos empleados en ejes tractivos (XDA-HT) y en semirremolques (XTE*) y el arreglo dual de llantas sencillas Michelin 11R22.5 para ejes tractivos (XDA-HT) y para ejes de carga (XZE). Los resultados se obtienen principalmente de simulaciones numéricas aplicadas en dinámica vehicular, de informes de prueba realizados por el fabricante, así como de mediciones experimentales en pista de pruebas. Las pruebas experimentales se enfocaron a la determinación de distancias de frenado y de características de estabilidad direccional. Las condiciones de frenado consideraron pavimento con superficie mojada, mientras que para la estabilidad direccional se provocó la pérdida

COPIA CONTROLADA

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

súbita de presión de las llantas en un lado de los ejes del semirremolque de una configuración T3S2 (ponchadura). Las características de manejabilidad y de estabilidad lateral se derivan de resultados de simulación del comportamiento dinámico de vehículos, atendiendo a las propiedades mecánicas y a las características geométricas de los tipos de llanta empleados. Asimismo, se proporciona información de carácter comparativo entre el comportamiento de llantas supersencillas Michelin con denominación 445/50R22.5 en los modelos XOne XDA, XOne XTA, XOne XTE y XOne XDA-HT y las llantas sencillas Michelin 275/80R22.5 en arreglo dual en versiones XDA2, XT-1, XZE y XDA-HT, resultante de simulaciones teórico-numéricas.

Puesto que el enfoque del estudio es comparativo, las características generales de los vehículos considerados en la simulación, fueron aquéllas correspondientes a una configuración vehicular articulada T3S2 de carga pesada típica.

Es menester mencionar que este estudio es aplicable ÚNICA Y EXCLUSIVAMENTE a las llantas de la marca y modelos mencionados. Los resultados aquí enunciados, no son necesariamente representativos o aplicables a llantas de otras marcas o tipos de características similares.

3 OBJETIVO

Evaluar comparativamente el desempeño de la llanta *Michelin* tipo *Super Single XOne* con respecto a llantas sencillas convencionales de la misma marca en un arreglo dual, con base en algunos parámetros de desempeño dinámico de vehículos de carga pesada.

4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

Las principales etapas establecidas para el desarrollo del estudio, fueron las siguientes:

1. *Obtención de información de propiedades mecánicas de llantas Michelin Super Single XOne y Michelin convencional.*
2. *Modelación (teórica-numérica) del comportamiento dinámico de un vehículo genérico de carga pesada usando llantas Super Single XOne y sencillas en arreglo dual.*
3. *Participación en la ejecución de pruebas de estabilidad direccional y de frenado, así como en la recopilación de resultados cuantitativos y cualitativos.*

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

4. *Aplicación de un análisis comparativo entre el desempeño de vehículos de carga con llantas supersencillas y llantas en arreglo dual convencional.*

De acuerdo a las etapas enunciadas, la empresa *Michelin North America Inc*., a través de Industrias Michelin, S. A. de C. V. en México, proporcionó información relativa a las principales características de desempeño individual de los modelos de llanta involucrados en el estudio. Las características fueron las relativas a la rigidez, al par de autoalineamiento y a la fuerza lateral en función de la deformación lateral y angular [1]. La información, convenientemente procesada, fue manejada como parte integral de modelos de simulación del comportamiento dinámico de vehículos. Estos modelos se emplearon para determinar el efecto relativo de las llantas neumáticas en el comportamiento de un vehículo articulado de carga pesada.

Paralelamente, con apoyo de la empresa *Michelin North America Inc*., se llevaron a cabo pruebas experimentales bajo condiciones controladas, en las que se provocó la falla súbita intencionada de las llantas en lado derecho de los ejes de un semirremolque de un vehículo T3S2. Las pruebas permitieron visualizar el efecto que la falla tuvo sobre la estabilidad direccional, considerando los casos de emplear llantas *Super Single XOne*, y de llantas sencillas en arreglo dual. Posterior a estas pruebas, se llevaron a cabo pruebas de frenado bajo condiciones de pavimento mojado, considerando los dos casos de empleo de llantas, como se enunció anteriormente.

Finalmente, una vez procesada tanto la información obtenida de simulación como la experimental, se llevó a cabo un análisis comparativo del efecto del uso de uno y otro tipo de llantas en un vehículo de carga pesada, analizando sus posibles implicaciones.

5 ASPECTOS TÉCNICOS CONSIDERADOS

5.1 GENERALIDADES

Debido a la complejidad de su comportamiento mecánico (estático y dinámico), para describir las capacidades mecánicas de las llantas neumáticas es necesario emplear un conjunto de parámetros asociados con la geometría y con fuerzas y deformaciones. Las cualidades de resistencia mecánica de una llanta se obtienen de pruebas de laboratorio, como las asociadas con la durabilidad y de resistencia a la penetración. Estas pruebas son aplicadas de acuerdo a procedimientos estandarizados, cuya ejecución brinda valores de referencia para los distintos tipos de llantas, proporcionando criterios relativos a su resistencia y a su durabilidad [2].

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Dentro de las cualidades de desempeño, que repercuten en la respuesta de la llanta bajo condiciones dinámicas, resaltan las capacidades de carga, de tracción y de frenado, así como las de ajuste a trayectorias curvas y de autoalineamiento [3]. Este conjunto de cualidades define, de acuerdo a las condiciones de carga y de operación de un vehículo, su adaptabilidad a las exigencias del entorno en función de sus características de manejabilidad.

Básicamente, el estudio se aplica a la obtención de información teórica y experimental que sustente, como ya se citó, un marco comparativo entre la llanta Michelin *Super Single XOne*, con respecto al arreglo dual de llantas Michelin sencillas. El estudio considera que las llantas son empleadas por un vehículo articulado de carga pesada clasificado como T3S2, compuesto por un tractocamión con el eje frontal direccional y dos ejes tractivos y un semirremolque con dos ejes de carga.

5.2 DESIGNACIÓN DE LAS LLANTAS

Los modelos de llanta Michelin considerados en el presente estudio, son: las *Super Single* (supersencilla) 455/55R22.5 en las versiones XOne XDA-HT y XOne XTE*, 445/50R22.5 en las versiones XOne XDA, XOne XTA, XOne XTE y XOne XDA-HT; las sencillas 11R22.5 en las versiones XDA-HT y XZE, así como 275/80R22.5 en las versiones XDA2, XT-1, XZE y XDA-HT.

Para estos casos, se aplican dos estilos de designación (nomenclatura). El primero es del tipo *a/pRd*, en el que *a* se refiere al ancho de la sección transversal [mm], *p* es la proporción del ancho como dimensión de la altura de la sección transversal [%], *R* significa tipo de construcción radial y *d* el diámetro nominal para montaje sobre el rin [pul]. El segundo estilo es del tipo el *bRd*, reflejado en este caso en llantas sencillas, en el que *b* indica el ancho de la sección transversal [pul], con *R* y *d* con la misma definición que en el estilo anterior [4, 5].

Por otro lado, de acuerdo al tipo de empleo de las llantas Michelin, una X como primera letra en el sufijo de la designación, indica construcción radial, mientras que a partir de la segunda se especifica la aplicación de la llanta, siendo una *D* para ejes tractivos, una *T* para ejes de carga en remolques y semirremolques, y una *Z* para especificar llantas denominadas “toda posición”.

5.3 ESQUEMAS DE COMPARACIÓN

El esquema de comparación establecido en este estudio, es tal como se indica en la Tabla I. De acuerdo al diseño y función de cada llanta, el modelo de llanta X-One

COPIA CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

indicado en la columna izquierda se compara con el correspondiente arreglo dual de llantas sencillas en la fila correspondiente de la columna de la derecha.

Tabla I. Modelos de llantas Michelin consideradas en el estudio.

Supersencilla		Sencilla en arreglo dual	
455/55R22.5	XOne XDA-HT	11R22.5	XDA-HT
455/55R22.5	XOne XTE*	11R22.5	XZE
445/50R22.5	XOne XDA	275/80R22.5	XDA2
445/50R22.5	XOne XTA	275/80R22.5	XT-1
445/50R22.5	XOne XTE	275/80R22.5	XZE
445/50R22.5	XOne XDA-HT	275/80R22.5	XDA-HT

Es importante notar que este documento enfatiza el análisis concerniente a las llantas supersencillas 455/55R22.5 Xone XDA-HT y Xone XTE*, con respecto a las sencillas 11R22.5 XDA-HT y XZE, respectivamente. Con este propósito, se acondiciona el vehículo (y el modelo, en su caso), con la configuración de llantas mostrada en la Tabla II. El caso 1 tuvo enfoques tanto de simulación como experimental, mientras que los casos 2 y 3 se trataron únicamente con modelos de simulación.

Tabla II. Grupos de comparación de los modelos de llantas en el estudio.

	Caso	Ejes tractivos	Ejes de carga
1a	Supersencilla	455/55R22.5 XOne XDA-HT	455/55R22.5 XOne XTE*
1b	Sencillas arreglo dual	11R22.5 XDA-HT	11R22.5 XZE
2a	Supersencilla	445/50R22.5 XOne XDA	445/50R22.5 XOne XTA
2b	Sencillas arreglo dual	275/80R22.5 XDA2	275/80R22.5 XT-1
3a	Supersencilla	445/50R22.5 XOne XDA-HT	445/50R22.5 XOne XTE
3b	Sencillas arreglo dual	275/80R22.5 XDA-HT	275/80R22.5 XZE

5.4 ASPECTOS DE SIMULACIÓN

Dentro del contexto teórico numérico, con el propósito de establecer el marco comparativo del efecto del uso de llantas supersencillas o de sencillas en arreglo dual, se hizo uso de un modelo numérico que simula el movimiento del vehículo en el espacio. Este modelo de vehículo considera las rotaciones alrededor de ejes vertical y longitudinal, para cada unidad vehicular involucrada en la configuración de análisis, originados por el desplazamiento en su dirección de avance. Estos movimientos se denominan técnicamente "*yaw*" y "*roll*" (coleo y balanceo), respectivamente. Los resultados obtenidos a partir de este modelo de simulación, permiten determinar diversos aspectos relativos a la estabilidad del vehículo, en términos de control direccional como de balanceo (volcadura).

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Como es sabido, la respuesta dinámica de un vehículo depende de diversos parámetros de índoles geométrico y mecánico. En esencia, estos parámetros hacen referencia a las dimensiones de la configuración, a la repartición de la carga, a la distribución de la masa en la geometría de cada unidad vehicular, a las condiciones de conectividad entre los elementos y a las características individuales de desempeño mecánico de los distintos sistemas [6]. Así mismo, debido a las diversas funciones que desempeñan las llantas, las propiedades de las mismas tienen un mayor efecto en el comportamiento dinámico global del vehículo.

5.5 ASPECTOS EXPERIMENTALES

Básicamente, se realizaron pruebas relativas al efecto de la pérdida súbita de presión (ponchadura) de las llantas del semirremolque sobre la estabilidad del vehículo T3S2, cuando éste tenía montadas en los ejes de tracción y de carga, llantas sencillas en arreglo dual (Figura 3, 5) o llantas supersencillas (Figura 4, 5). De la misma manera, se realizaron pruebas de frenado sobre pavimento mojado. Cabe mencionar que las llantas empleadas en las pruebas, tanto sencillas como supersencillas, fueron seleccionadas aleatoriamente dentro de los esquemas de producción y disponibilidad de las plantas de manufactura de Michelin, en EU.

Figura 3. Vehículo T3S2 con llantas sencillas en arreglo dual.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Figura 4. Vehículo T3S2 con llantas supersencillas XOne.

Figura 5. Llantas sencillas en arreglo dual (izquierda) y XOne (derecha) en ejes tractivos del tractocamión de prueba.

Con respecto al esquema de instrumentación empleado, éste consistió en instrumentos medidores de aceleración colocados sobre la parte central del chasis del semirremolque (Figura 6), orientados ortogonalmente, en direcciones vertical y transversal, para el caso de pruebas de pérdida súbita de presión, y vertical y longitudinal, para el caso de pruebas de frenado.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Figura 6. Colocación de acelerómetros en el chasis del semirremolque.

La adquisición y el registro de los datos se apoyaron del uso de un sistema de adquisición instalado en una computadora portátil, montada sobre la cabina del vehículo (Figura 7). Los datos fueron procesados para estimar en un plano horizontal absoluto, aceleración vertical y lateral y ángulo de balanceo del semirremolque, en el caso de las pruebas de ponchadura, y de tiempo y distancia, para el caso de frenado.

Figura 7. Vista parcial del sistema de adquisición de datos colocado en la cabina del tractocamión.

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS TEÓRICO-NUMÉRICOS

Manejabilidad

Las características de manejabilidad de un vehículo se relacionan con la respuesta que éste puede tener ante acciones de cambio de dirección. El comportamiento

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

direccional de la combinación vehicular T3S2 de referencia, se determinó mediante la simulación de una maniobra direccional tipo rampa [7]. La maniobra consiste en desplazar el vehículo a velocidad de avance constante (100 km/h), mientras se incrementa gradualmente el ángulo de giro del volante y, por tanto, la orientación de las llantas direccionales. El cambio en la dirección se introduce a una razón constante (velocidad angular constante), obteniendo un cambio en la aceleración lateral de aproximadamente 0,01 g (g se refiere al valor estándar de la aceleración de la gravedad, en propósitos prácticos de 9,81 m/s^2). Así, la trayectoria resultante del desplazamiento de avance y su cambio constante de dirección, es de forma espiral.

Para vehículos articulados, la manejabilidad se obtiene para las unidades que componen la combinación vehicular. Sin embargo, las condiciones generales de estabilidad direccional de un vehículo son principalmente establecidas por la unidad direccional (el tractocamión, para combinaciones articuladas).

Las características de manejabilidad se deducen de un diagrama en el que se grafica la aceleración lateral contra la relación $L\Omega_z/V_x$-δ_f. En la expresión anterior, L representa la distancia base entre ejes (tractocamión) o la distancia del centro del grupo de ejes al punto de articulación (semirremolque), Ω_z es la velocidad angular del vehículo, V_x es la velocidad de avance del vehículo y δ_f representa el ángulo de dirección sobre las llantas delanteras (tractocamión), o el ángulo de articulación entre el tractocamión y el semirremolque. Con base en esta representación, un indicador directo de la condición de viraje corresponde a la razón de cambio de la aceleración lateral con respecto a la orientación global del vehículo sobre la trayectoria. En términos prácticos, una pendiente negativa corresponde a una condición de subviraje, mientras que una pendiente positiva lo es al sobreviraje.

La condición global de subviraje facilita la conducción de la combinación, en términos de que se requiere manipular el volante de dirección y, por tanto las llantas direccionales, con mayores intervalos de giro para mantener el vehículo sobre una trayectoria curva. Una respuesta direccional muy rápida podría incrementar el riesgo asociado a la pérdida de control durante un cambio de dirección del vehículo.

Caso 1

Considerando el vehículo T3S2 de referencia, el diagrama de manejabilidad para el uso de llantas tractivas (tractocamión), del tipo 11R22.5 XDA-HT para dobles y del tipo 455/55R22.5 XOne XDA-HT para supersencillas, se muestra en la Figura 8.

COPIA CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

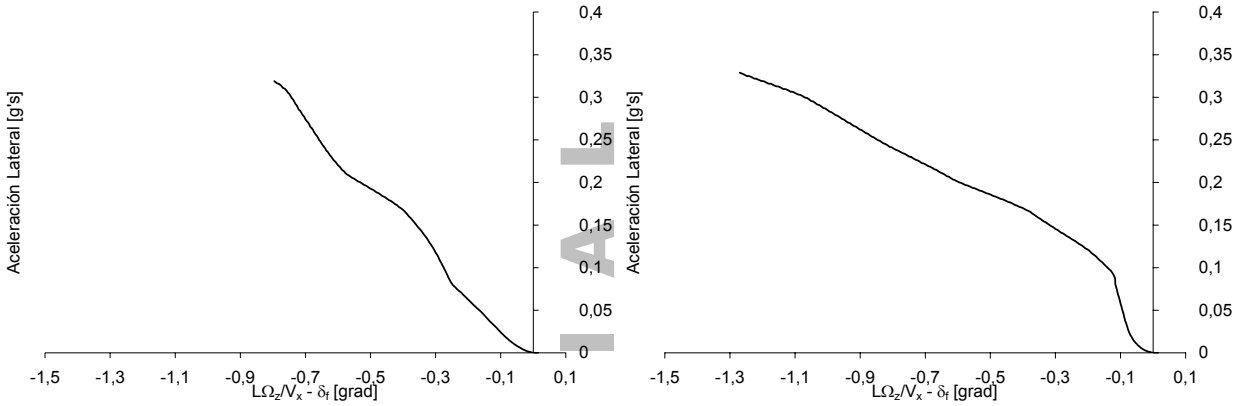

Figura 8. Diagrama de manejabilidad del tractocamión, empleando en el eje tractivo llantas sencillas en arreglo dual 11R22.5 XDA-HT (izquierda) o llantas supersencillas 455/55R22.5 XOne XDA-HT (derecha).

Puede apreciarse que el comportamiento del tractocamión tiene características de subviraje, tanto al emplear llantas sencillas en arreglo dual, como al emplear llantas supersencillas XOne. Puede notarse un mayor subviraje con el uso de llantas supersencillas.

Para el caso del semirremolque, el diagrama de manejabilidad al emplear llantas de carga del tipo 11R22.5 XZE para duales o llantas supersencillas 455/55R22.5 XOne XTE*, se muestra en la Figura 9.

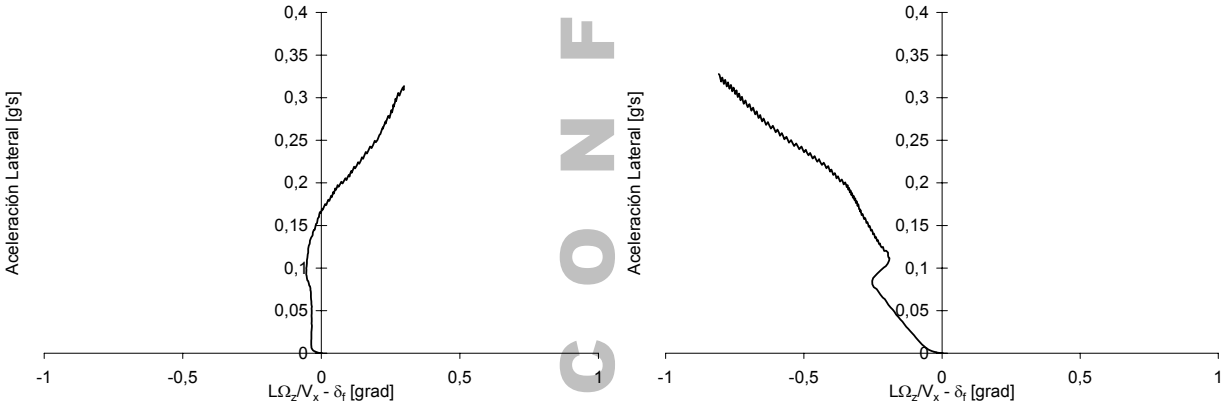

Figura 9. Diagrama de manejabilidad del semirremolque, con llantas sencillas en arreglo dual 11R22.5 XZE (izquierda) o llantas supersencillas 455/55R22.5 XOne XTE (derecha).*

De esta figura se observa que en el semirremolque, el uso de llantas sencillas tiene inicialmente características de manejabilidad neutral, que posteriormente le confieren

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

características de sobreviraje, mientras que las llantas supersencillas proporcionan globalmente una condición de subvirado.

Caso 2

Siguiendo el mismo patrón de comparación, el segundo caso de análisis correspondiente al uso de llantas sencillas 275/80R22.5 XDA2 y XT-1 o supersencillas 445/50R22.5 XOne XDA y XTA, la Figura 10 muestra el diagrama de manejabilidad para el tractocamión con llantas tractivas 275/80R22.5 XDA2 ó 445/50R22.5 XOne XDA, mientras que la Figura 11 corresponde al semirremolque con llantas 275/80R22.5 XT-1 ó 445/50R22.5 XOne XTA.

CONFIDENCIAL

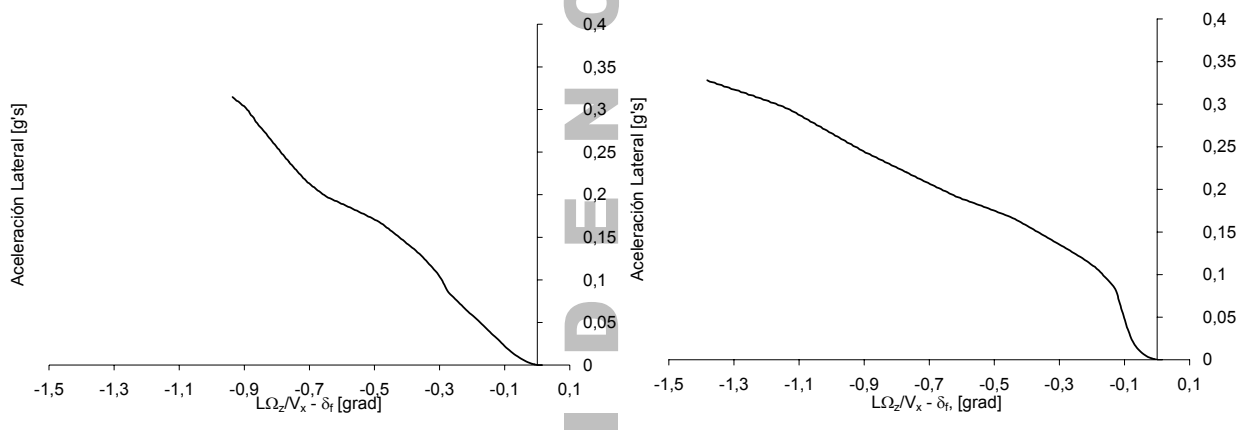

Figura 10. Diagrama de manejabilidad del tractocamión, con llantas duales 275/80R22.5 XDA2 (izquierda) o supersencillas 445/50R22.5 XOne XDA (derecha) en los ejes tractivos.

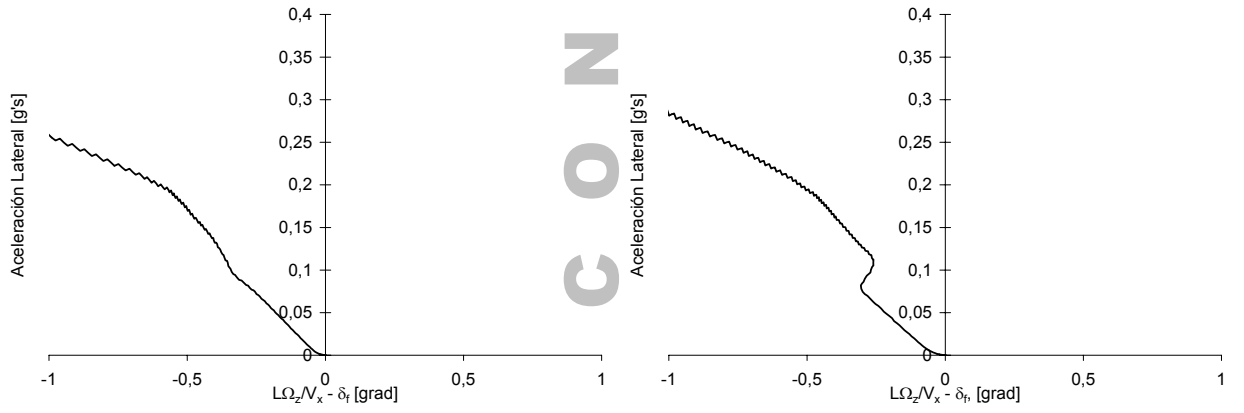

Figura 11. Diagrama de manejabilidad del semirremolque, con llantas sencillas en arreglo dual 275/80R22.5 XT-1 (izquierda) o supersencillas 445/50R22.5 XOne XTA (derecha).

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

De las figuras anteriores, puede observarse la condición de subviraje con características muy similares, tanto en el tractocamión como en el semirremolque, con un ligero mayor subviraje en el tractocamión con llantas supersencillas, incluso para un valor de aceleración también ligeramente mayor, lo que implica un mayor intervalo de operación bajo la condición de subvirado.

Caso 3

Considerando nuevamente la combinación T3S2 con llantas sencillas o supersencillas en los ejes de tracción y de carga, para el tercer caso de análisis, las características de manejabilidad con el tractocamión empleando llantas duales 275/80R22.5 XDA-HT o supersencillas 445/50R22.5 XOne XDA-HT, se ilustran en la Figura 12.

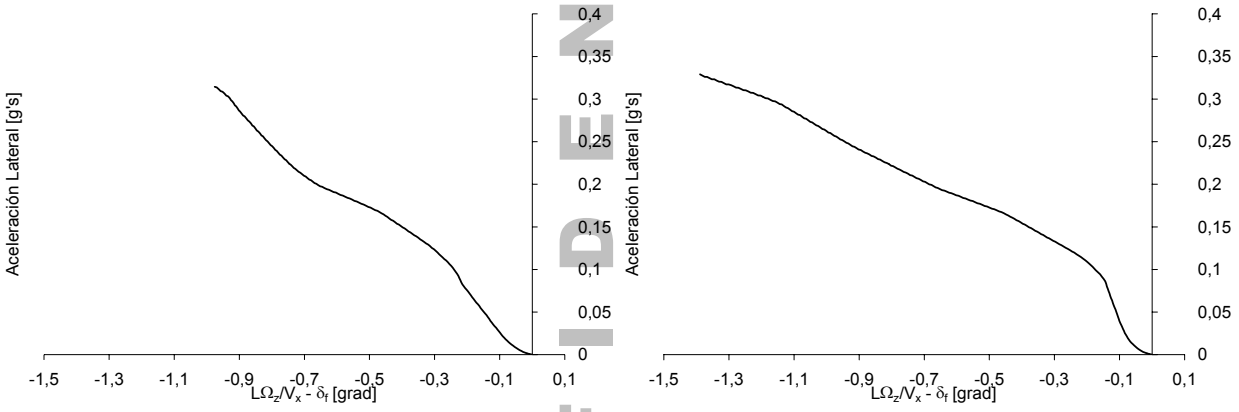

Figura 12. Diagrama de manejabilidad del tractocamión, con llantas 275/80R22.5 XDA-HT en dual (izquierda) o supersencillas 445/50R22.5 XOne XDA-HT (derecha) en los ejes tractivos.

Como puede notarse también en este caso, el uso de llantas supersencillas brinda al tractocamión un mayor subviraje, permitiendo tener cambios más suaves en los niveles de aceleración conforme se adapta a los cambios de dirección en una trayectoria curva, comparado con el uso de llantas sencillas en arreglo dual.

Posteriormente, la Figura 13 corresponde al diagrama de manejabilidad del semirremolque, ya sea empleando el arreglo dual de llantas 275/80R22.5 XZE o las supersencillas 445/50R22.5 XOne XTE. En esta figura, similar al primer caso, se observa que el uso de llantas 275/80R22.5 XZE en el semirremolque le aportan características de sobreviraje, mientras que las 445/50R22.5 XOne XTE mantienen la cualidad de subviraje.

COPIA CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

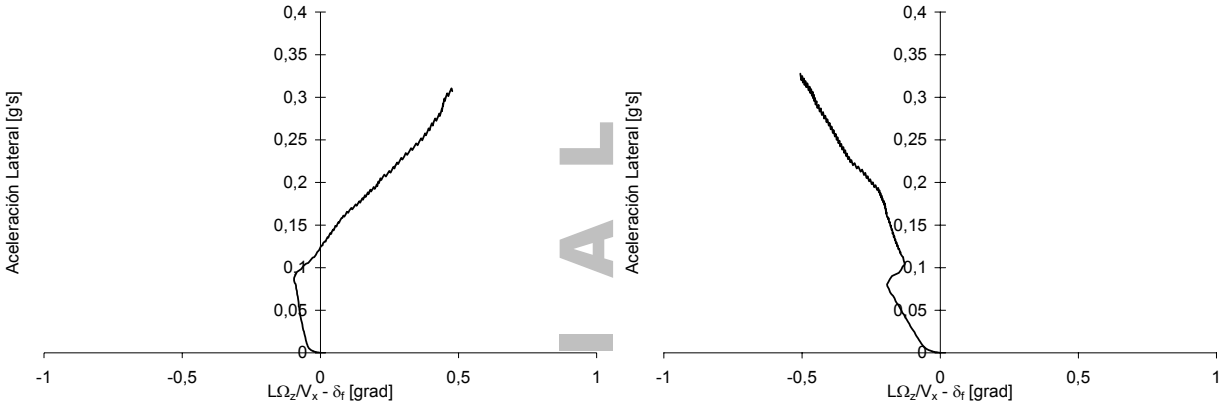

Figura 13. Diagrama de manejabilidad del semirremolque, con llantas sencillas en arreglo dual 275/80R22.5 XZE (izquierda) o supersencillas 445/50R22.5 XOne XTE (derecha).

Estos tres casos de análisis conducen a que el efecto del uso de llantas supersencillas, en los modelos tratados en este estudio, mejora en general la manejabilidad del vehículo, manteniéndolo estable en un intervalo de aceleración lateral ligeramente mayor, comparado con el uso de los modelos respectivos de llantas sencillas en arreglo dual.

Estabilidad direccional

Para obtener los parámetros relativos a la estabilidad direccional, se simuló una maniobra rápida de cambio de carril. La simulación requiere una maniobra con una velocidad de avance del vehículo de 100 km/h, tratando de producir una aceleración lateral cercana a 0,15 g's en el centro de gravedad del tractocamión [7]. Los datos proporcionados por esta simulación, permiten estimar la razón de transferencia lateral de carga durante la combinación del desplazamiento longitudinal con el transversal del vehículo, así como la amplificación del coleo.

Razón de Transferencia Lateral de Carga

La razón de transferencia lateral de carga (*LTR*, *Load Transfer Ratio en inglés*) es una medida relativa de la carga que dinámicamente se transfiere de un lado al otro en un vehículo. Esta medida se combina con el tamaño de la huella de la llanta, obtenida experimentalmente para las llantas 11R22.5 XDA-HT y 11R22.5 XZE (Figura 14), como para las llantas 455/55R22.5 XOne XDA-HT y 455/55R22.5 XOne XTE* (Figura 15). Esta combinación permite comparar la relación entre la carga soportada por el eje y la superficie de contacto con el piso.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Figura 14. Tamaño de huella relativo para las llantas 11R22.5 XDA-HT (izquierda) y XZE (derecha).

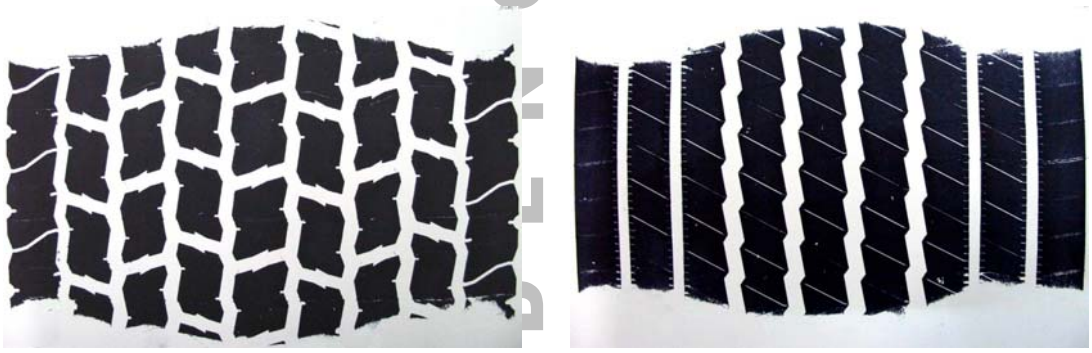

Figura 15. Tamaño de huella relativo para las llantas 455/55R22.5 XOne XDA-HT (izquierda) y XTE (derecha).*

En situación estática, tanto las ruedas del lado izquierdo como las del lado derecho de la configuración, soportan cada lado el 50% de la carga. En este caso, el valor *LTR* es nulo. De los resultados de la simulación, la Tabla III muestra un resumen de los valores relativos de LTR, para los grupos de llantas analizados.

Tabla III. Resumen del valor relativo LTR para tractocamión y semirremolque.

Caso	Llantas	LTR relativo (a/b)
1a	455/55R22.5 XOne XDA-HT y XTE*	1,06
1b	11R22.5 XDA-HT y XZE	
2a	445/50R22.5 XOne XDA y XTA	0,99
2b	275/80R22.5 XDA2 y XT-1	
3a	445/50R22.5 XOne XDA-HT y XTE	1,03
3b	275/80R22.5 XDA-HT y XZE	
Promedio		*1,03*

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

En esta tabla, para cada caso, *a* representa las llantas supersencillas, mientras que *b* representa las llantas duales. Como se indica en la misma, la relación del LTR de la llanta supersencilla entre el LTR del arreglo dual, es en promedio 1,03, lo que implica que la transferencia lateral de carga para ambos tipos de llanta es similar. Sin embargo, considerando el valor efectivo de la superficie de contacto para las llantas en el caso particular 1, se estima que las llantas supersencillas soportan aproximadamente un 15% más de carga por unidad de superficie que el arreglo dual de llantas sencillas, según el tamaño de la superficie de la huella.

Amplificación del Coleo

La amplificación del coleo (*RWA*, *Rearward Amplification en inglés*) se estima en términos de la relación de la máxima aceleración lateral experimentada por la última unidad y la experimentada por la primera. Para la configuración de T3S2, este parámetro es un indicador de la proporción en que el semirremolque se mueve lateralmente con respecto al tractocamión.

De acuerdo a los datos obtenidos de los modelos de simulación, la Tabla IV resume el valor relativo de RWA para los grupos de llantas analizados. Como en la tabla anterior, *a* representa las llantas supersencillas y *b* representa las llantas duales.

Tabla III. Resumen del valor relativo RWA para tractocamión y semirremolque.

Caso	Llantas	Relación de RWA (a/b)
1a	455/55R22.5 XOne XDA-HT y XTE*	1,09
1b	11R22.5 XDA-HT y XZE	
2a	445/50R22.5 XOne XDA y XTA	1,01
2b	275/80R22.5 XDA2 y XT-1	
3a	445/50R22.5 XOne XDA-HT y XTE	1,08
3b	275/80R22.5 XDA-HT y XZE	
Promedio		*1,06*

De la misma manera que en el caso del LTR, el valor RWA relativo muestra que el coleo inducido en ambos casos sobre el vehículo, es decir, usando llantas supersencillas o llantas duales, es similar, con ligeramente mayor coleo para el caso de las llantas supersencillas, como lo muestran los valore mayores a 1. Sin embargo, para propósitos prácticos, puede considerarse una participación equivalente, con diferencias menores al 9%.

COPIA NO CONTROLADA

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Pérdida súbita de presión

En esta prueba, el vehículo T3S2 descrito con anterioridad, siguió una trayectoria recta de aproximadamente 1500 m, unida a una curva con radio aproximado de 365 m (1200 pie) y aproximadamente 300 m de longitud (Figura 16). La velocidad de desplazamiento se mantuvo constante en 88,5 km/h (55 mph).

Figura 16. Vista parcial de la trayectoria de prueba, con la curva indicada por los conos de advertencia.

Cuando el vehículo se encontraba en la curva, se hizo estallar una carga explosiva previamente montada sobre las llantas del lado derecho del semirremolque (Figura 17 y 18), es decir, del lado externo a la curva.

Figura 17. Detalles del proceso de colocación de explosivo en las llantas en arreglo dual.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Figura 18. Preparación de las llantas XOne para la prueba de estallamiento.

Durante el evento, mientras se realizaba la medición de la aceleración producida en el semirremolque, el conductor mantuvo la unidad sobre la trayectoria circular hasta detener completamente su marcha al final de la curva. En las Figuras 19 y 20 se aprecia el estado físico de las llantas después del evento.

Figura 19. Estado de las llantas sencillas después de la prueba de estallamiento.

Figura 20. Estado de las llantas supersencillas después de la prueba de estallamiento.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Los resultados obtenidos, tanto de aceleración como de ángulo de balanceo, se muestran gráficamente en las Figuras 21 y 22. La Figura 21 indica la aceleración horizontal y vertical del semirremolque, ocasionada por el estallamiento de las llantas. En la gráfica concerniente a las llantas duales, se observa una magnitud pico de aproximadamente -2,5 g en la dirección vertical, así como una curva de atenuación que se acerca al valor de 0 g's a mayor tiempo.

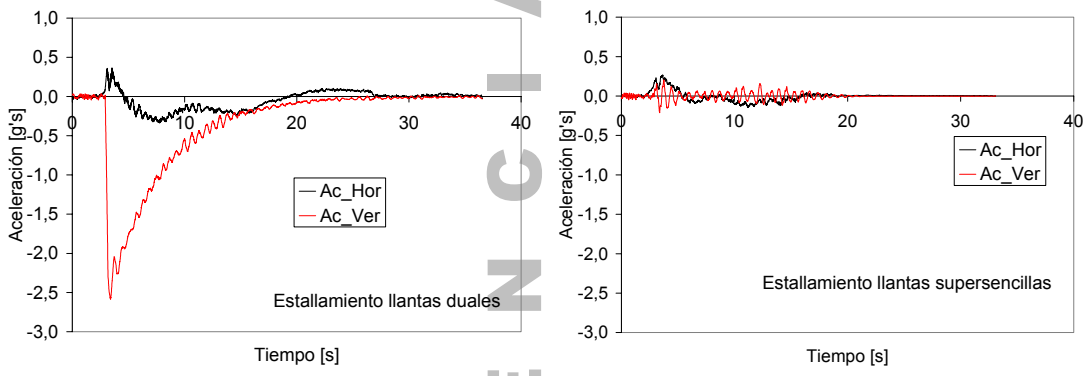

Figura 21. Aceleración horizontal y vertical obtenida de las pruebas de estallamiento.

Durante la prueba, la magnitud real de aceleración fue mayor al valor indicado, ya que se sobrepasó la capacidad de medición del instrumento correspondiente, registrándose únicamente el valor máximo entregado por el dispositivo. En contraste, la gráfica concerniente a la aceleración producida por el estallamiento de las llantas supersencillas, muestra bajos niveles de aceleración, lo que indica movimientos más suaves o menos severos durante el evento.

Por otro lado, la Figura 22 muestra la variación del ángulo de balanceo sufrido por el semirremolque. Respecto al estallamiento de las llantas duales, la gráfica muestra una oscilación más prolongada debido a que, alcanzando el final de la curva, el vehículo requirió una maniobra adicional para colocarlo en una posición segura. Sin embargo, a pesar de la magnitud del máximo ángulo indicado (aproximadamente 13°), el ángulo de balanceo depende también del movimiento vertical registrado por los acelerómetros, cuya condición se expuso anteriormente. Este efecto se refleja al inicio de la oscilación, cerca de los 3 segundos del registro, en el cual se aprecia en la gráfica un desplazamiento angular brusco, que va de 0° a -5°, para posteriormente incrementarse hasta 13°, teniendo un intervalo de movimiento angular cercano a los 18°.

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

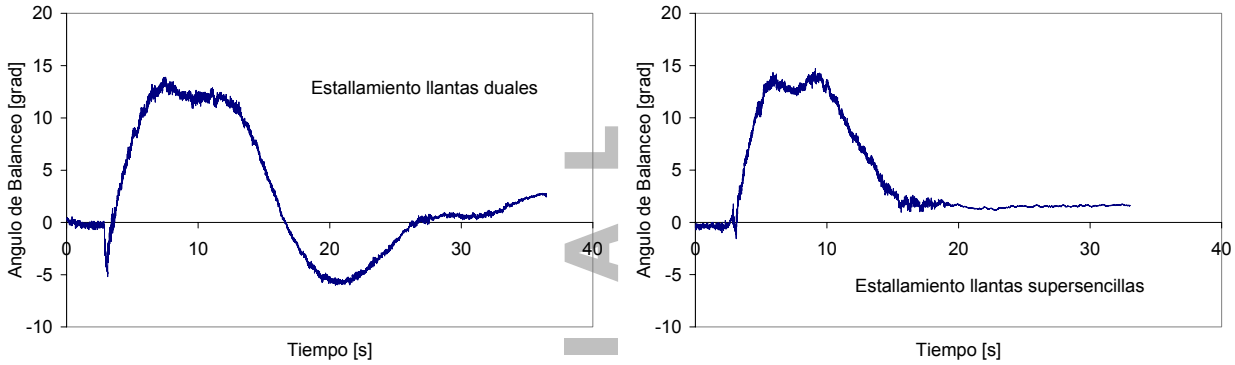

Figura 22. Ángulo de balanceo del semirremolque en las pruebas de estallamiento.

Con relación al ángulo de balanceo para el caso de las llantas supersencillas, se observa que el inicio de la oscilación, alrededor del tercer segundo, es más suave, con una alternancia menor que en el caso anterior. Aquí se observa que el ángulo de balanceo máximo es cercano a los 14°, quedando el semirremolque en posición de reposo con una inclinación de aproximadamente 2°.

Frenado

Las pruebas de frenado se realizaron sobre una pista recta expuesta a una lluvia artificial fina y continua, que mantuvo al pavimento mojado. El vehículo se hizo transitar a una velocidad de 88,5 km/h (55 mph) y al llegar a la zona de pavimento húmedo se aplicó el freno completamente y de manera súbita por medio de un pistón neumático (Figura 23). El vehículo T3S2 empleó el conjunto de llantas en arreglo dual 11R22.5 XDA-HT y XZE, y el conjunto de supersencillas 455/55R22.5 XOne XDA-HT y XOne XTE*, para los ejes de tracción y de carga, respectivamente en ambos casos.

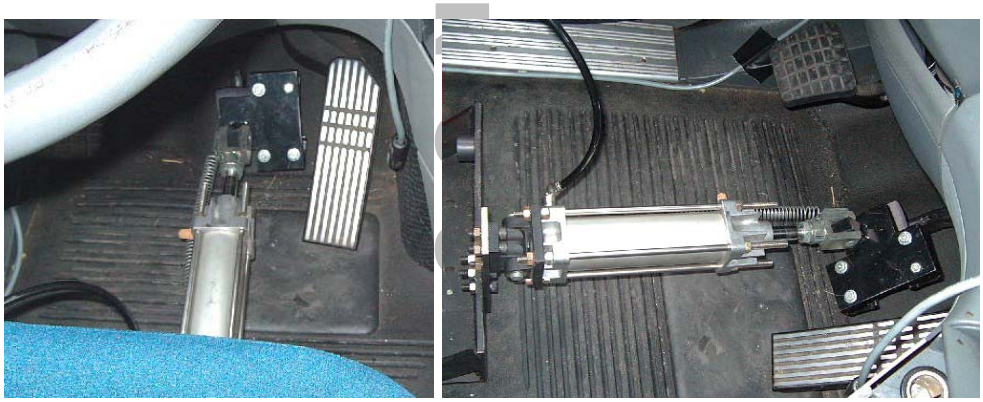

Figura 23. Vistas parciales del dispositivo de aplicación del freno.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

Durante estas pruebas, se registró la aceleración longitudinal, como se muestra en la Figura 24. A partir de estos datos de aceleración (desaceleración) se estimó la distancia a la cual el vehículo alcanza, de una velocidad inicial de 88,5 km/h, prácticamente la posición de reposo (Tabla IV).

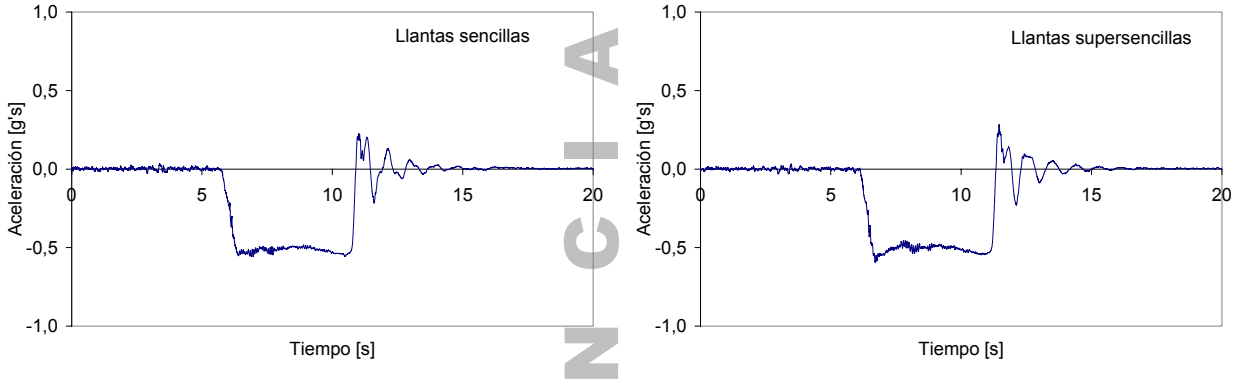

Figura 24. Ejemplo de registro de aceleración longitudinal durante pruebas de frenado.

Tabla IV. Distancias estimadas de frenado, [m].

Evento	11R22.5 XDA-HT y XZE	455/55R22.5 XOne XDA-HT y XOne XTE*
1	57,73	58,77
2	60,75	61,30
3	59,26	61,17
4	59,99	59,47
Promedio	*59,43*	*60,18*

Como puede apreciarse de los valores indicados en la tabla anterior, las distancias de frenado son semejantes, cuyo promedio es ligeramente mayor en 0,75 m para las llantas supersencillas, que representa una diferencia del 1,24%.

Manejabilidad (subjetiva)

Adicionalmente a las pruebas de estallamiento y de frenado, se realizaron pruebas con un vehículo unitario del tipo C2, transitando sobre una pista circular con pavimento mojado (Figura 25), tratando de mantener una velocidad uniforme alrededor de 72,4 km/h (45 mph). Comparado con el uso de llantas sencillas en arreglo dual en los ejes posteriores, el vehículo con llantas supersencillas mejoró la condición de subviraje del vehículo, proporcionando un mayor control al conductor bajo las mismas condiciones de prueba. Esta condición se manifestó por movimientos más uniformes y suaves del

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

volante de dirección, acompañado de una menor necesidad de uso de los pedales de frenado y de aceleración, comparado con el uso de llantas duales.

Figura 25. Aspectos del desarrollo de prueba subjetiva de manejabilidad en pista circular con pavimento mojado.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los análisis tratados en este estudio, permiten concluir que las llantas supersencillas Michelin 455/55R22.5 XOne XDA-HT y XTE*, presentan desempeño global más favorable que las llantas sencillas Michelin 11R22.5 XDA-HT y XZE en arreglo dual, respectivamente. La superficie de contacto con el piso de la llanta XOne es alrededor de 15% menor que el dual de llantas sencillas. Si bien en frenado, el desempeño de las llantas XOne no es notoriamente distinto al de llantas sencillas en arreglo dual, aquella presenta mejores características de estabilidad ante una súbita pérdida de presión (ponchadura), comparada con su contraparte de llantas sencillas.

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

De las simulaciones realizadas, las llantas Michelin 445/50R22.5 XOne XDA-HT, XOne XDA, XOne XTA y XOne XTE, muestran tendencias similares de desempeño dinámico, con ventajas significativas en el control direccional con respecto a los arreglos duales de llantas sencillas Michelin 275/80R22.5 XDA-HT, XDA2, XT-1 y XZE, respectivamente. El efecto sobre la transferencia lateral de carga, así como de amplificación del coleo, es similar en ambos tipos de llanta, supersencillas y sencillas en arreglo dual.

NOTA: Los resultados de simulación presentados son derivados de un vehículo articulado genérico, utilizado únicamente como referencia para comparación, supuesto operado bajo condiciones ideales. En general, el comportamiento dinámico de un vehículo resulta de la interacción de todos sus componentes, de las condiciones del entorno físico, de las condiciones de carga y de operación, siendo además, sensible a los hábitos y costumbres de conducción del operador.

REFERENCIAS

1. Industrias Michelin, S. A. de C. V. 2003. Información técnica relativa a propiedades mecánicas y de desempeño de llantas Michelin Super Single 455/55R22.5 XOne XDA-HT, 455/55R22.5 XOne XTE*, 445/50R22.5 XOne XDA, 445/50R22.5 XOne XTA, 445/50R22.5 XOne XTE, 445/50R22.5 XOne XDA-HT, 11R22.5 XDA-HT, 11R22.5 XZE, 275/80R22.5 XDA2, 275/80R22.5 XT-1, 275/80R22.5 XZE y 275/80R22.5 XDA-HT.

2. NOM-086/1-SCFI-2001. “Industria Hulera - Llantas para Camión - Especificaciones de Seguridad y Métodos de Prueba”. Dirección General de Normas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

3. Gillespie, T. D. 1992. “Fundamentals of Vehicle Dynamics”. Society of Automotive Engineers, Inc. PA. USA.

4. NOM-016-SCT-2-1996. “Industria Hulera - Llantas para Camión - Especificaciones y Métodos de Prueba”. Dirección General de Autotransporte Federal. Secretaría de Comunicaciones y trasnportes.

5. Fitch, J. W. 1993. “Motor Truck Engineering Handbook”. Fourth Edition. Society of Automotive Engineers, Inc. PA. USA.

6. Wong, J. Y. 1978. “Theory of Ground Vehicles”. John Wiley and Sons, Inc. NY. USA.

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.

7. El-Gindy, M. 1995. “An Overview of Performance Measures for Heavy Commercial Vehicles in North America”. International Journal of Vehicle Design, Vol 16, Nos. 4/5, pp 441-463.

CONFIDENCIAL

- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización escrita del Director General del Instituto Mexicano del Transporte.
- Las firmas avalan el contenido del documento.
- El documento no es válido si presenta alguna desviación con respecto al documento original.