

## **ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS IRREGULARIDADES DE LA CARRETERA SOBRE LA DINÁMICA DEL VEHÍCULO**

**Nelson G. Cotella, Ariel H. Manelli, Sergio F. Antonelli**

Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nacional 36, Km. 601 – (5800) RIO CUARTO  
Córdoba – República Argentina  
Tel. (54) 358 467 62 58 – Fax (54) 358 467 62 46.  
ncotella@ing.unrc.edu.ar, amanelli@ing.unrc.edu.ar, santonelli@ing.unrc.edu.ar

**Key words:** Dinámica vehicular, Reductores de velocidad, lomos de burro, Traffic calming

**Resumen:** *En su tránsito cotidiano los vehículos automotores superan distintos tipos de irregularidades de la carretera. Estas pueden ser aleatorias o construidas con un fin determinado, como por ejemplo lomos de burro y badenes.*

*Con el objeto de analizar las acciones generadas por el sobrepaso de estas irregularidades sobre los distintos órganos del vehículo y sus ocupantes, se realizó un estudio mediante simulación por ordenador utilizando para ello un programa que permite calcular los esfuerzos dinámicos en las suspensiones y aceleraciones en distintas partes del automóvil.*

*Para el desarrollo del trabajo se utilizó el programa de simulación de dinámica vehicular: CARSIMED Educational V. 4.51, Enero de 2000, Mechanical Simulation Corporation (USA). Se centró el estudio en el sobrepaso de lomos de burro, se relevaron los perfiles de éstos y se obtuvieron resultados de la aceleración en el centro de gravedad del vehículo, ángulo de cabeceo del vehículo, esfuerzos sobre los amortiguadores y elementos elásticos de la suspensión y fuerzas actuantes sobre los neumáticos para diversas velocidades de sobrepaso.*

*La aplicación de un programa de simulación combinado con el método de medición in situ del perfil de la carretera resultaron aptos para estudiar la dinámica del vehículo en el sobrepaso de las singularidades presentes en el camino.*

*Podemos concluir que la utilización de la simulación permite disminuir los tiempos de estudio, además de eliminar el riesgo que implica ensayar los perfiles de lomas a distintas velocidades de sobrepaso. La simulación por computadora es una herramienta adecuada para el diseño seguro de singularidades de la carretera.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Es frecuente que en el trazado vial de nuestro país las rutas atraviesen en su recorrido poblaciones de distinto tamaño. Ya sea desde su construcción o porque el conjunto urbano se extendió a la vera del camino ocupando sus adyacencias.

Hoy, debido al aumento de la cantidad de vehículos que circulan y a la elevada velocidad que muchos de ellos desarrollan, las autoridades de estos lugares atendiendo a los lógicos pedidos de seguridad por parte de los vecinos, construyen las conocidas “lomas de burro” o “lomadas” que proliferan con el objeto de regular la velocidad de circulación de dichos vehículos.<sup>1, 2, 3</sup>

El objetivo que se debe perseguir con las lomadas es producir una aceleración vertical que incomode al conductor y a los pasajeros, ello sin producir riesgos adicionales. Dichos riesgos pueden acontecer en el caso que el conductor no advierta la presencia de la loma por mala señalización, distracción, condiciones atmosféricas, estado psicofísico inadecuado, entre otras y atraviere la misma a una velocidad mayor que la prevista para la loma pero dentro de las máximas para el camino que transita. Ello no debe producir la pérdida del control del vehículo, sino que la aceleración vertical debe ser tal que lo llame a la reflexión y devuelva su atención a la conducción.<sup>4, 5</sup>

Con el objeto de analizar las acciones generadas por el sobrepaso de estas irregularidades sobre los distintos órganos del vehículo y sus ocupantes, se realizó un estudio mediante simulación por ordenador utilizando para ello un programa que permite calcular los esfuerzos dinámicos en las suspensiones y aceleraciones en distintas partes del automóvil. Posteriormente se evaluaron los efectos que las lomas de burro producen sobre el vehículo y sus ocupantes. De esta manera se pudo comparar los efectos que causan al ser transitados a diferentes velocidades.

## 2 DESARROLLO

Para el desarrollo del trabajo se utilizó el programa de simulación de dinámica vehicular: CARSIMED Educational, Versión 4.51 de Enero de 2000, provisto por la Mechanical Simulation Corporation (USA).

Este programa simula dinámicamente un vehículo automotor utilizando un modelo de cinco cuerpos rígidos ligados mediante sistemas de ecuaciones diferenciales lineales. Estos cuerpos representan idealmente la carrocería del vehículo y las cuatro masas no soportadas rígidamente por el anterior, como son los cuatro neumáticos con sus correspondientes conjuntos de suspensión y rodadura.<sup>6</sup>

Para la simulación utiliza un modelo de 18 grados de libertad distribuidos de la siguiente manera: En el espacio del cuerpo rígido que representa la carrocería del automóvil tenemos tres translaciones posibles: en avance o retroceso (eje x), en movimientos a derecha o izquierda (eje y) y en el sentido vertical (eje z). Los tres giros factibles son: (movimientos alrededor de los ejes x (rolido) eje y (cabeceo) y eje z (guiñada). Figura 1.

Cada rueda es analizada por separado, considerando los movimientos verticales correspondientes a cada rueda, al igual que los giros según los ejes y (rotación) y z (ángulo de giro) de las mismas.



Figura 1. Disposición de los ejes coordenados en el vehículo.

Los elementos de la suspensión están vinculados a la carrocería por elementos elásticos y amortiguadores. El programa permite variar los parámetros de cada uno de estos, como así también el tipo de neumáticos y de sistema de dirección que posee el vehículo.

## 2.1 Datos de entrada

Para realizar la simulación, Carsim requiere de las características del vehículo, de la carretera y de la maniobra que se realiza (frenado, aceleración o curva). En el caso de nuestro interés la variable de entrada es el perfil de la carretera, por lo tanto el vehículo estará animado de movimiento rectilíneo uniforme.

a) Características del vehículo: El programa requiere del ingreso de los parámetros dimensionales y dinámicos del vehículo. Entre ellos se destacan la trocha, la distancia entre ejes, la altura del centro de gravedad y los parámetros dimensionales de la suspensión. Entre los aspectos dinámicos son imprescindibles la distribución de pesos por eje, los momentos de inercia, la masa de los cuerpos no suspendidos por la carrocería, la rigidez de los elementos de la suspensión, la constante de los amortiguadores y los parámetros característicos de los neumáticos, entre otros.

b) Perfil de la carretera: Además de las características del vehículo es necesario ingresar los parámetros externos que intervienen en la simulación. Aquí son necesarias las condiciones iniciales (velocidad, dirección) con el fin de que el vehículo alcance la irregularidad (loma de burro) en las condiciones deseadas.

c) Maniobra realizada. Es factible introducir en la simulación variaciones en el ángulo del volante de dirección, la posición del acelerador, la presión en el sistema de frenos, etc.

## 2.2 Procesamiento de los datos y resultados obtenidos del programa

Para calcular el desenvolvimiento dinámico de cada sólido rígido, el software utiliza 32 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que relacionan los parámetros del vehículo, de la carretera, la maniobra y las condiciones iniciales. Estas ecuaciones son resueltas a partir de los datos de entrada y de ellas obtenemos los desplazamientos de la carrocería y las ruedas en el dominio del tiempo. De éstos se pueden obtener velocidades y aceleraciones de la carrocería en cada uno de sus ejes y las velocidades y aceleraciones traslacionales y angulares de cada uno de los neumáticos, como así también las fuerzas actuantes en las tres direcciones principales de cada neumático.

En lo que refiere al centro de gravedad del vehículo, el programa calcula la posición, la velocidad y la aceleración lineal y angular en los tres ejes principales a lo largo de la trayectoria.

Adicionalmente a los enumerados anteriormente, este software calcula parámetros referidos al neumático (como ángulos de deriva y deformaciones) y a los componentes de la suspensión (como fuerzas soportadas por elementos elásticos y amortiguadores).

Las limitaciones más importantes que destacamos de la versión educativa del Carsim se producen al descartar los efectos aerodinámicos sobre el vehículo, linealizar las suspensiones y no considerar restricciones físicas que existen en el recorrido de las mismas.

## 3 APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.

A fin de analizar las acciones dinámicas que se ejercen sobre los vehículos y sus ocupantes al transponer estos lomos de burro, se estudió uno de ellos construido in situ en las inmediaciones de Río Cuarto. Las lomadas construidas de esta manera, ya sea con asfalto u hormigón, presentan perfiles disímiles en lo que hace a su altura, longitud y radio de empalme con la carretera.

Como estos lomos de burro no responden a un patrón determinado, se procedió a relevar longitud, altura y forma geométrica de los perfiles más agresivos emplazados en nuestra zona de influencia. El posterior análisis de estos datos condujo a presentar un perfil del lomo de burro típico. Para ello se adoptó un perfil circular de 3 m de longitud y 180 mm de altura.

Esto se muestra en la figura 2 y 3

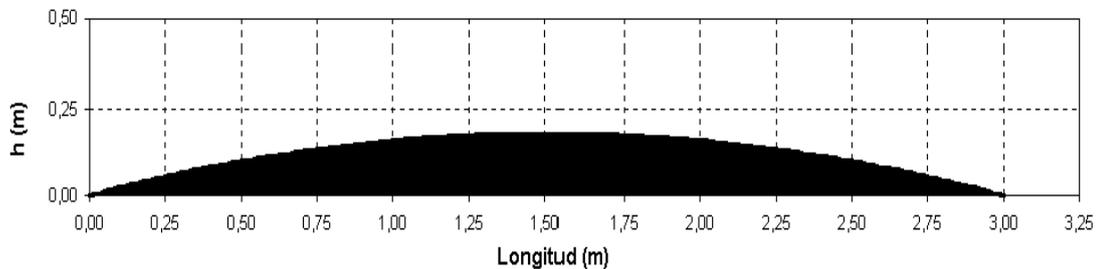


Figura 2. Perfil típico de la zona de Río Cuarto (longitud 3 m, altura 180 mm).



Figura 3. Fotografía de uno de los lomos de burro relevados

#### 4 RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de la acción de los lomos de burro sobre el vehículo y sus ocupantes, se obtienen de la interacción de los dos parámetros fundamentales, a saber:

- Características del vehículo.
- Velocidad de sobrepaso.

En cuanto a las características del vehículo y considerando el parque automotor de nuestro país, se adoptaron las correspondientes a un automóvil de la gama media. Los datos correspondientes al vehículo, utilizados para introducir en el programa, se obtuvieron de datos suministrados por el fabricante, mediciones realizadas sobre el mismo y de ensayos realizados de algunos elementos, como por ejemplo, las constantes de los elementos elásticos de la suspensión.

La velocidad de paso sobre los lomos de burro se estableció coincidente con la estipulada por ley<sup>7,8</sup> y/o los carteles indicadores aledaños a los mismos. En la simulación también se utilizaron velocidades mayores a fin de analizar el efecto de las mismas sobre vehículo y ocupantes en el caso de transponerlas excediendo la velocidad recomendada.

De los resultados arrojados por el programa se seleccionaron los siguientes para evaluar las acciones de las lomas de burro sobre los ocupantes y el vehículo:

La aceleración del centro de gravedad del vehículo se muestra en la Figura 4, en esta se puede apreciar como varía el valor máximo de la aceleración con las distintas velocidades de sobrepaso. La aceleración vertical es creciente con el incremento de velocidad y coincidente con el tránsito del eje delantero sobre el perfil de la loma. Este parámetro provee una indicación de la incomodidad que produce la acción de la loma de burro en los ocupantes de vehículo<sup>9</sup>.

En el caso de la velocidad de 60 km/h, vemos que la aceleración supera 1 g, este valor indica que todo elemento que se encuentre suelto en el interior del vehículo se proyectará dentro de éste, resultando esta situación muy peligrosa para la seguridad de los ocupantes.

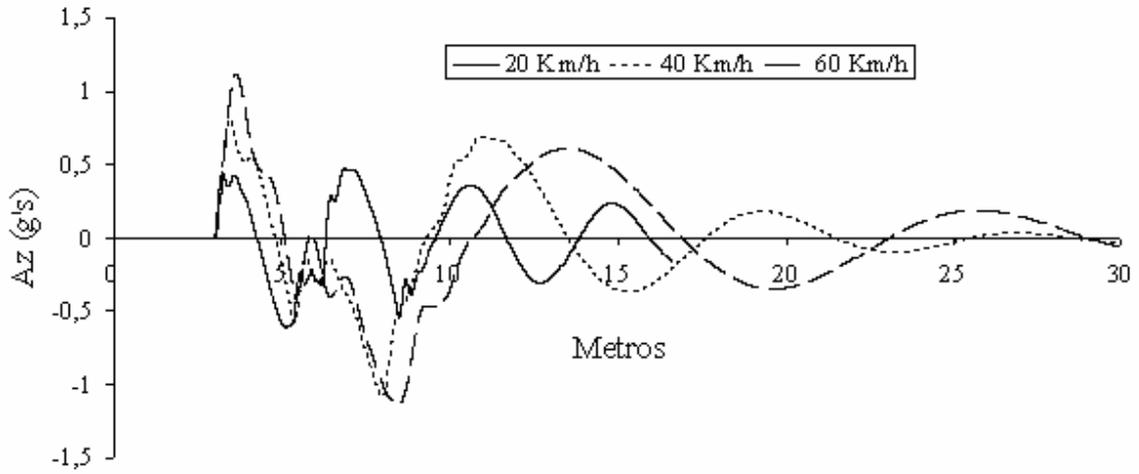


Figura 4 Aceleración en el centro de gravedad del vehículo.

En la figura N° 5 se observa que los valores de esfuerzo máximo a que son sometidos los elementos amortiguadores comprometen la vida útil de los mismos. Podemos destacar que los valores reales que soportan los mismos son mayores a los mostrados, ya que el modelo solo permite simular un comportamiento lineal de los mismos, sin límite en su recorrido.

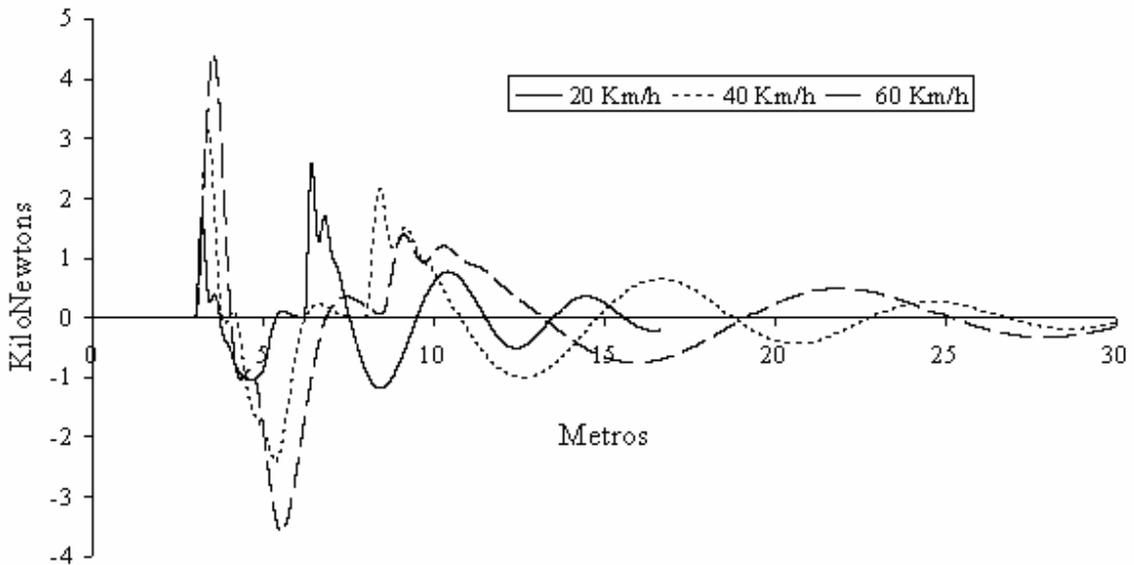


Figura 5. Esfuerzos sobre un amortiguador delantero.

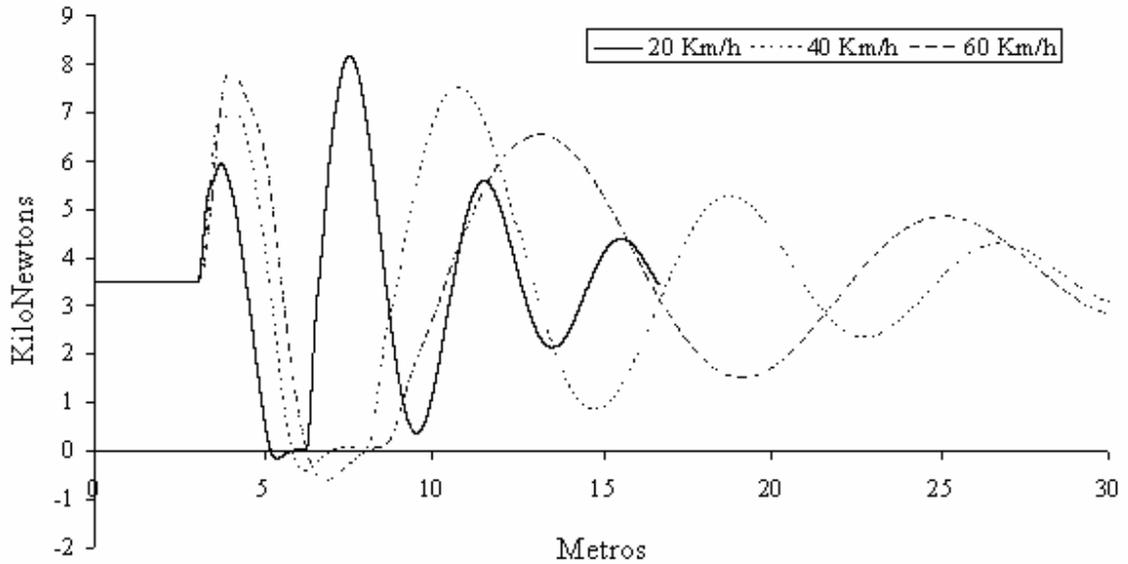


Figura 6. Esfuerzos sobre un elemento elástico delantero.

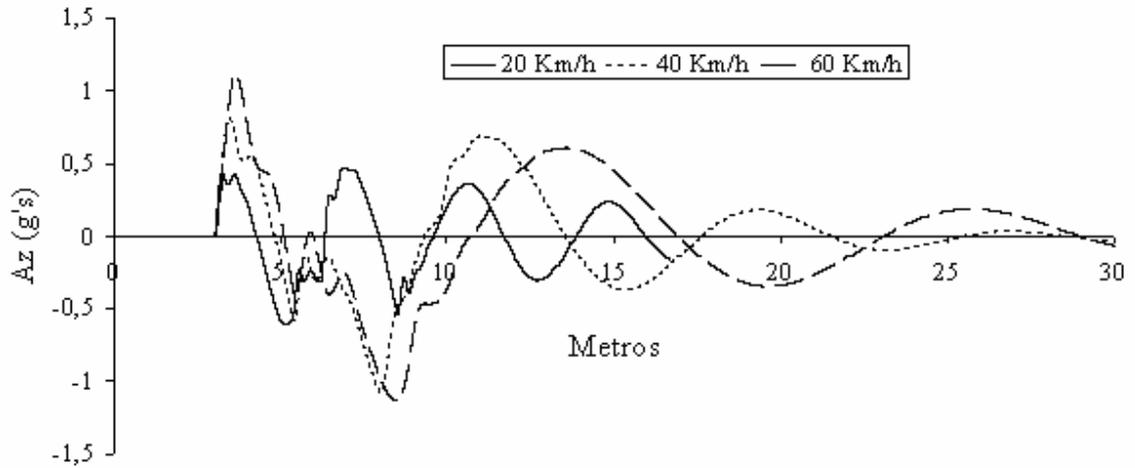


Figura 7 Fuerza actuante sobre un neumático delantero.

Los esfuerzos sobre los elementos elásticos del eje delantero, mostrados en la Figura 6, destacan valores elevados de la carga dinámica, crecientes con la velocidad de sobrepaso, que llegan a superar duplicar de la carga estática. Además se observa que para las distancias de 5 a 10 metros aparecen valores negativos de esfuerzos.

Al estudiar las fuerzas de interacción entre el neumático y la calzada, Figura 7, se destaca que dicha fuerza, para determinadas condiciones de tránsito se hace cero durante un periodo considerable. Esto implica la pérdida de adherencia entre el vehículo y la carretera, lo que puede llevar a la pérdi-

da del control direccional del vehículo y ser afectada la capacidad de frenado, especialmente cuando ocurre en el eje delantero.<sup>10,11</sup>

Del análisis de los resultados se observó que este perfil puede producir efectos perjudiciales para los componentes de suspensión al sobrepasarlos a las velocidades permitidas por la normativa vigente. Estos efectos podrían producir no solo daños permanentes en los componentes de la suspensión del vehículo, sino también esfuerzos que por su magnitud disminuyen considerablemente la vida útil de los mismos.<sup>12,13</sup>

## 5 CONCLUSIONES

La simulación mediante el programa CARSIM se presentó apta para estudiar la dinámica del vehículo y las acciones sobre los ocupantes en el sobrepaso de lomos de burro.

La utilización de la simulación por ordenador para realizar el análisis fue muy importante para disminuir los tiempos de estudio y reducir costos al prescindir de elementos de medición sobre el vehículo. Además de eliminar el riesgo humano y material que implica ensayar los perfiles de bmas a altas velocidades de sobrepaso.

Los resultados del estudio demuestran que los lomos de burro deben proveer simultáneamente reducción de la velocidad y seguridad en su sobrepaso, siendo la simulación por computadora una herramienta imprescindible para su diseño. Esto puede ser extendido a otras irregularidades de la carretera (p ej. badenes, desagües etc.)

## 6 REFERENCIAS.

- <sup>1</sup> Ewing, Reid H. "Traffic Calming: State Of The Practice" -. Institute of Transportation Engineers. 1999.
- <sup>2</sup> "Streets For People, Traffic Calming In Your Neighborhood" -Neighborhood streets network. 1998.
- <sup>3</sup> "Descripción Sintética: Autorización Para La Construcción De Lomadas" - Ordenanza N° 689-CM-96 San Carlos de Bariloche. 1996
- <sup>4</sup> "Bumps, Humps And Other Vital Decisions" - Key West City Commission Report , 2000
- <sup>5</sup> "Geometric Design Practices For European Road2 - International Technology Exchange Program, June 2001 - U.S. Departament of Transportation – Federal Highway Administration.
- <sup>6</sup> CARSIMED Versión 4.51 Mechanical Simulation Corporation USA – Manual de Referencia. 2000
- <sup>7</sup> Ley 24449 y sus decretos reglamentarios – Ley de Tránsito y Seguridad Vial.
- <sup>8</sup> Ley Provincial de Tránsito No 8560. Ley de Tránsito de la Provincia de Córdoba.
- <sup>9</sup> "Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration" International Standard ISO 2631-1: 1997

<sup>10</sup> Aparicio Izquierdo, F. Vera Alvarez, C. Díaz López V. “Teoría De Los Vehículos Automotores”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – Madrid 1995.

<sup>11</sup> Thomas D. Gillespie “Fundamentals Of Vehicle Dynamics”. Society of Automotive Engineers, Inc. EEUU 1992.

<sup>12</sup> “Para Reducir La Velocidad Se Desaconsejan Los Reductores” - <http://www.cospec.com.ar/laciudad/anteriores/ejem230.htm> 2000

<sup>13</sup> Carlos Tabasso Cammi “Los Reductores De Velocidad Coactivos, Familia De Peligrosos Dispositivos De Seguridad Vial” <http://www.seguridad-vial.com/biblio/reductores.htm>.