

Análisis experimental del comportamiento dinámico de las furgonetas

F. Jiménez Alonso⁽¹⁾, O. Gómez Casado⁽¹⁾, F. Aparicio Izquierdo⁽¹⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Universidad Politécnica de Madrid
felipe.jimenez@upm.es

Los accidentes de tráfico con implicación de furgonetas suponen una importante preocupación en la actualidad, ya que su evolución en los últimos años no ha sido acorde con la experimentada por otro tipo de vehículos. Existen numerosos factores que influyen en la accidentalidad de las furgonetas de índole muy diversa, asociados al vehículo, al conductor y al uso.

En concreto, en este artículo se analiza experimentalmente el comportamiento dinámico de estos vehículos, con el fin de determinar la coherencia de las siguientes hipótesis iniciales:

- H1: Las furgonetas pueden tener un comportamiento dinámico diferente a los turismos, por lo que los accidentes de furgonetas pueden incrementarse si se conducen como turismo.
- H2: Las furgonetas pueden estar sometidas a estados de carga muy variables lo que puede redundar en variaciones significativas del comportamiento dinámico.

Las furgonetas se han clasificado en 4 grades grupos: vehículos pick-up, camión chasis-cabina o autobastidor entre 2000 y 3500 kg, furgón van y misto/combi entre 2000 y 3500 kg, y derivados de turismo (van y furgoneta) generalmente inferiores a 2000 kg. Para la realización del estudio, se han planificado y realizado ensayos de frenado y giro de volante definidos en la normativa para el estudio del comportamiento dinámico.

Se ha analizado la deceleración alcanzable en cada situación por cada vehículo, contando con casos de vehículos dotados de ABS y otros que no disponen de tal sistema. Las diferencias son notables entre tener ABS o no (aspecto que puede resultar crítico desde un punto de vista accidentalológico dado que las furgonetas disponen de menos sistemas de seguridad activa y pasiva que los turismos), aunque no tan importantes entre los diferentes tipos de furgonetas. La carga se puede convertir en un factor relevante cuando se incurre en sobrecargas. De igual forma, se ha estudiado su comportamiento virador, caracterizado por el ajuste del coeficiente de viraje, donde también ha quedado patente la influencia de la carga.

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tráfico con implicación de furgonetas suponen una importante preocupación en la actualidad, ya que su evolución en los últimos años no ha sido acorde con la experimentada por otro tipo de vehículos. Existen numerosos factores que influyen en la accidentalidad de las furgonetas de índole muy diversa, asociados al vehículo, al conductor y al uso.

Una de las hipótesis de trabajo para justificar el diferente comportamiento en cuanto a reducción de accidentes de las furgonetas frente a otro tipo de vehículos como los turismos reside en el hecho de que las furgonetas puede presentar un comportamiento dinámico muy diferente al de los turismos, mientras que sus conductores no necesitan de permisos de conducir específicos. Por otra parte, estos vehículos pueden estar sometidos a estados de carga muy variables que influyan sobre ese comportamiento dinámico. En este sentido, los conductores han manifestado mayoritariamente que este tipo de vehículos responde de forma diferente y debe ser conducido de forma diferente a un turismo y, además, que el estado de carga influye sobre dicho comportamiento.

Para analizar los anteriores aspectos, se ha planteado un enfoque teórico-experimental que incluye ensayos en pista y simulaciones con un programa de dinámica vehicular, con el fin de corroborar o refutar las hipótesis anteriores. Debido a la diversidad de tipologías de vehículos que se pueden calificar como furgonetas, se ha planteado una categorización:

- Grupo 1: vehículos pick-up
- Grupo 2: camión chasis-cabina o autobastidor entre 2000 y 3500 kg
- Grupo 3: furgón van (3.1) y mixto/combi (3.2) entre 2000 y 3500 kg
- Grupo 4: derivados de turismo van (4.1) y furgoneta (4.2), generalmente inferiores a 2000 kg

Así, el enfoque adoptado puede ser sintetizado como sigue:

1. Ensayos en pista

Se desarrollan ensayos en pista con furgonetas de las diferentes categorías. Estos ensayos son, fundamentalmente, maniobras de frenado desde varias velocidades iniciales y ensayos de giro de volante [1, 2]. En el primer caso, se realizan ensayos en vehículos con y sin ABS, llegándose, en algunos casos a desactivar el sistema en vehículos dotados del mismo para realizar las comparaciones oportunas. En el caso de los ensayos de giro de volante, se realizan aquellos orientados a la determinación del comportamiento virador (ensayos a radio constante, a velocidad constante y a ángulo de giro de volante constante) dado que éstos son relativamente fáciles de reproducir y se alcanzan altos niveles de repetitividad. Además, en todos los casos, se ha analizado la influencia de la carga, con ensayos en tres estados de carga.

2. Simulaciones

El enfoque experimental presenta la limitación de que ciertas maniobras son difíciles de reproducir de forma repetitiva y en condiciones de seguridad. Por ello, se recurre al uso de programas de simulación de la dinámica vehicular para comparar el comportamiento entre furgonetas y turismos bajo maniobras de esquivar, cambio de carril, etc.

2. RESULTADOS DEL ENFOQUE EXPERIMENTAL

2.1. Tipos de vehículos

En los ensayos se busca comprobar si existen diferencias significativas entre el comportamiento dinámico de los turismos y las furgonetas. Además, se compara el comportamiento de furgonetas pertenecientes a diferentes grupos. De esta forma, se contempla en el proyecto ensayar los vehículos indicados en la tabla 1.

Modelo	Grupo	MMA (kg)	Batalla (mm)
Iveco Daily (chasis – cabina)	2	3500	4050
Iveco Daily (furgón)	3.1	3500	3300
Mercedes Vito	3.1	2700	3000
Peugeot Partner	4.2	2040	2728
Peugeot 307	4.1	1755	2608

Tabla 1: Vehículos ensayados

En este sentido debe observarse que los turismos cubren también el grupo identificado como turismos van (subgrupo 4.1). Por otra parte, dada su baja representatividad en el parque de furgonetas, se obvia la realización de ensayos con vehículos del grupo 1 (pick-up).

2.2. Estados de carga

En los ensayos se busca comprobar si existen diferencias significativas en el comportamiento dinámico cuando la furgoneta está sometida a diferentes estados de carga. Para ello, se contempla la repetición de los ensayos con 3 estados de carga combinando pasajeros y carga, según el tipo de vehículo (orden de marcha, media carga, plena carga).

Así, se han lastrado los vehículos tanto en la zona de pasajeros como de carga, empleándose bidones de agua de capacidad 25 y 70 litros, simulando éstos últimos la carga de un pasajero.

2.3. Definición de los ensayos de frenado

El objetivo de estos ensayos es determinar la capacidad de frenada del vehículo en procesos de frenado severos. Para ello, se realizan ensayos de frenada en recta desde diferentes velocidades iniciales sobre pista horizontal y siguiendo las indicaciones recogidas en [3].

Los ensayos se han realizado en la pista con la que cuenta el INSIA-UPM en sus instalaciones y que permite alcanzar velocidades de 70-80 km/h con seguridad. Las velocidades iniciales ensayadas, salvo excepciones prácticas, están comprendidas entre 30 y 80 km/h

2.4. Definición de los ensayos para determinar el comportamiento virador

El objetivo es determinar el comportamiento virador de los vehículos. Para ello, se plantean los siguientes ensayos:

- Ensayos a radio constante [4]. Obtención de la curva $\delta - v$ para un radio fijo
Circulación sobre un radio conocido a diferentes velocidades estables y medida del giro de volante y la aceleración lateral
 - Cálculo de la ganancia de aceleración lateral
 - Cálculo de la ganancia de guiñada
 - Cálculo de la ganancia de curvatura
- Ensayos a velocidad constante
Circulación a una velocidad constante con varios giros de volante y medida del ángulo de giro de volante y la aceleración lateral
- Ensayos con ángulo de volante constante
Circulación con un ángulo de giro de volante constante a diferentes velocidades y medida del radio de la trayectoria y la aceleración lateral

Los ensayos se han realizado en la pista con la que cuenta el INSIA-UPM en sus instalaciones. En dicha pista se encuentran marcadas circunferencias de diferentes radios que facilitan la realización de algunas de las maniobras anteriores (con independencia del seguimiento de dichas líneas durante los ensayos, se registrará la trayectoria descrita para comprobar que, en efecto, se ha tenido el radio buscado). Siendo de 25 metros, aproximadamente, el radio máximo que se puede describir, el radio elegido es de 20 metros (en alguna situación particular se prueban radios de 12.5 metros, aunque la necesidad de circular a velocidades excesivamente bajas dificulta su mantenimiento durante toda la prueba).

Tras la realización de algunas pruebas, se descarta la realización de ensayos de cambio de carril, adelantamiento o slalom, dada la baja repetibilidad de los resultados y la dificultad de mantener una velocidad constante a lo largo de todo el ensayo. Este tipo de maniobras es abordado en el enfoque teórico a través de simulación de la dinámica vehicular.

2.5. Instrumentación

Las variables que se desean medir son, fundamentalmente: radio de la trayectoria, velocidad, giro de volante, aceleraciones longitudinal y transversal y velocidad de guiñada. Para ello, se dispone del siguiente equipamiento, en función del vehículo que se ensaye:

- Sensor de velocidad sin contacto L-CE Correvit
- Plataforma giroscópica RMS FES 33
- Sensor de giro de dirección de las ruedas RV4
- Receptor GPS ASTECH modelo G-12

- Acelerómetro Sensorex 4610
- Sensor de hilo ASM
- Tarjeta de adquisición DAQCard-700 de National Instruments
- Tarjeta de adquisición Advantech USB-4711A
- Conversor de Bus Can Vector CANcaseXL

Dada la dificultad de montaje del giróscopo en diferentes vehículos de forma rápida al requerir utillajes específicos y puntos de anclaje, se plantea obtener las medidas proporcionadas por éste (aceleraciones longitudinal y lateral y velocidad de guiñada) de forma indirecta a partir de la velocidad y el radio. En un ensayo realizado sobre una trayectoria de radio fijo y conocido se ha medido la aceleración lateral, la velocidad de guiñada y la velocidad del vehículo. Los resultados muestran una buena correspondencia.

Por otra parte, el extraer la información del bus de comunicaciones del vehículo requiere del conocimiento de su protocolo. Si bien de algunos vehículos las señales requeridas son conocidas, en otros no ocurre así, con lo que se realizará la instrumentación con sensores externos (sensor de hilo en la dirección o sensor en la rueda). Esta solución de sensores externos también debe emplearse en vehículos que, por su antigüedad, no cuenten con el bus de comunicaciones.

2.6. Resultados de los ensayos de frenado

La tabla 2 muestra los resultados de los ensayos de frenada en las diferentes furgonetas y en los 3 estados de carga.

Pesos			Ensayo de frenada	
Eje delantero	Eje trasero	Total	Deceleración (m/s ²)	
			Con ABS	Sin ABS
Vehículo IVECO DAILY CHASIS CABINA				
Categoría			2	
1535	1375	2910	8.50	6.82
1485	2165	3650	8.43	6.72
1520	2790	4310	7.81	
Vehículo IVECO DAILY FURGÓN				
Categoría			3 (subgrupo 1)	
1330	1020	2350	9.34	
1325	1740	3065	9.02	
1405	2410	3815	8.80	
Vehículo MERCEDES VITO				
Categoría			3 (subgrupo 1)	
1240	875	2115		6.08
1285	1015	2300		6.05
1385	1565	2950		5.68
Vehículo PEUGEOT PARTNER				
Categoría			4 (subgrupo 2)	
915	660	1575	9.10	
1020	925	1945	8.98	
1045	1200	2245	9.09	
Vehículo PEUGEOT 307				
Categoría			4 (subgrupo 1)	
850	550	1400	8.67	
915	655	1570	8.81	
1010	785	1795	8.01	

Tabla 2: Resultados de los ensayos de frenado

El análisis anterior muestra que las mayores reducciones en la capacidad de frenado se producen cuando se incurren en sobrecargas, detectándose, en general, sólo pequeñas variaciones de dicha capacidad cuando el incremento de la carga es moderado. Por otra parte, debe reflejarse la importante caída en la capacidad de frenado que se produce si el vehículo no dispone de ABS, aunque, aún en estos casos, la evolución con la carga es semejante a la que se presentaba en los vehículos con ABS. Por último, cabe indicarse que las posibilidades de sobrecargar una furgoneta son, en general, mayores que un turismo, dada la concepción de su espacio de carga. Esto hace que las situaciones de carga alta, que conllevan las reducciones de capacidad de frenado más significativas, se puedan producir con más frecuencia en el uso de estos vehículos.

2.7. Resultados de los ensayos para el análisis de comportamiento virador

Como parámetro para comparar el comportamiento virador, se ha escogido el coeficiente de viraje K_v . Para su determinación, se ha realizado el ajuste por mínimos cuadrados de los coeficientes de un polinomio de segundo grado sin término lineal que relacione el ángulo de dirección de las ruedas y la velocidad, acorde con la expresión que se deriva de plantear un modelo de vehículo simplificado en el que se elimina la transferencia de carga y sólo se considera una rueda por eje:

$$\delta = \frac{L}{R} + \left(\frac{P_d}{K_{ad}} - \frac{P_t}{K_{at}} \right) \cdot \frac{v^2}{gR} = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{v^2}{gR} \quad (1)$$

donde δ es el ángulo de dirección de las ruedas, L es la batalla del vehículo, R es el radio de la curva, v es la velocidad del vehículos, P_d y P_t son los pesos sobre los ejes delantero y trasero del vehículo y K_{ad} y K_{at} son las rigideces de deriva en los ejes delantero y trasero.

Con el valor de K_v calculado se ha procedido después a comprobar la coherencia de otros resultados como la ganancia de aceleración lateral, de velocidad de guiñada y de curvatura. Las figuras siguientes muestran algunos ejemplos del ajuste realizado. La figura 1 muestra el ajuste a los puntos experimentales. La tabla 3 muestra los resultados alcanzados para los diferentes vehículos ensayados.

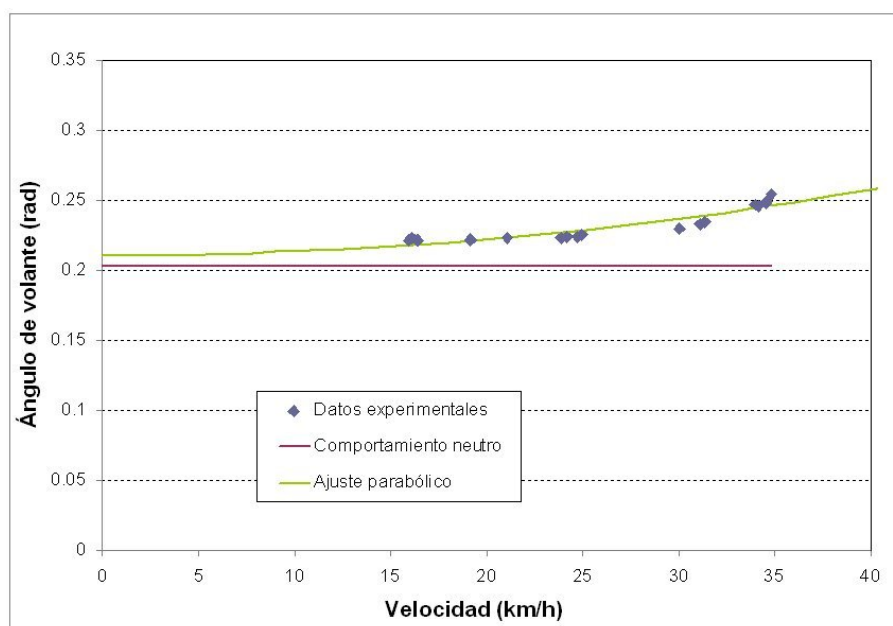


Figura 1: Ajuste del coeficiente de viraje a los datos experimentales

Pesos			Ensayo de giro de volante
Eje delantero	Eje trasero	Total	K_v
Vehículo IVECO DAILY CHASIS CABINA			
Categoría			2
1535	1375	2910	0.0746
1485	2165	3650	0.1088
1520	2790	4310	0.0784
Vehículo IVECO DAILY FURGÓN			
Categoría			3.1
1330	1020	2350	0.0173
1325	1740	3065	0.0185
1405	2410	3815	0.0108
Vehículo MERCEDES VITO			
Categoría			3.1
1240	875	2115	0.129
1285	1015	2300	0.1386
1385	1565	2950	0.1716
Vehículo PEUGEOT PARTNER			
Categoría			4.2
915	660	1575	0.0754
1020	925	1945	0.0804
1045	1200	2245	0.073
Vehículo PEUGEOT 307			
Categoría			4.1
850	550	1400	0.0541
915	655	1570	0.0606
1010	785	1795	0.0704

Tabla 3: Resultados del coeficiente de viraje ajustado a partir de los datos experimentales

Los resultados experimentales han proporcionado buenos ajustes en el caso de ensayos a radio constante, aunque existe una mayor dispersión en los ensayos a velocidad o giro constantes. Atendiendo a los datos de K_v ajustados, cabe indicarse que no se pueden obtener patrones concluyentes, ni en cuanto a la influencia de la carga ni al tipo de vehículo. Así, el turismo (categoría 4.1) aumenta su comportamiento subvirador al cargarlo más mientras que, otros vehículos tienen un comportamiento diferente y difícil de justificar. Este hecho, junto a la no repetitividad de algunas maniobras motiva el empleo de programas de simulación de la dinámica vehicular.

3. RESULTADOS DEL ENFOQUE TEÓRICO

3.1. Planteamiento de las simulaciones

El programa de simulación empleado es el TruckSim de Mechanical Simulation. Este programa tiene una amplia librería de modelos de vehículos industriales y permite la simulación de maniobras en bucle abierto y cerrado. De igual forma, permite la modificación de gran número de parámetros de los componentes del vehículo (suspensión, dirección, motor, neumático, etc).

En las simulaciones realizadas se pretende determinar la influencia del vehículo y de la carga. Para ello, se han elegido un con la configuración de chasis-cabina (denominado en la base de datos del programa como Large European Van). Como pesos y dimensiones se adoptarán los del vehículo ensayado de la categoría 2, es decir, la Iveco Daily chasis-cabina.

En la elección de las maniobras debe hacerse notar que se ha tenido en cuenta los escenarios más usuales de accidentes con furgonetas, En la mayor parte de los mismos, no

existe acción alguna por parte del conductor. En algunos se ha observado una maniobra de frenado previa a la colisión y, en otros, dicha maniobra podría haber evitado el sinistro. Sin embargo, los ensayos en pista han resultado bastante concluyentes en este tipo de maniobras tanto en lo referente al tipo de vehículo como a la carga y la presencia o no del ABS. Por otra parte, en otro grupo de accidentes se ha observado una maniobra brusca del conductor sobre el volante que le hace perder el control. Estas maniobras resultan complicadas de reproducir en simulación (y de conocer en cada caso de forma fiel), pero su fase inicial se puede aproximar, en muchos casos, por una acción senoidal sobre el volante.

Así, se toman dos tipos de maniobras:

- En primer lugar se reproducirán las maniobras de giro de volante en las maniobras de radio constante, con el fin de determinar el comportamiento virador del vehículo. Estas simulaciones vienen motivadas por el hecho de la alta dispersión de resultados de K_v obtenidos a partir de los ensayos en pista y las conclusiones, en algunos casos contradictorias, que se obtuvieron.
- Por otra parte, se simulará una entrada de volante senoidal. En concreto, se simula un ciclo completo de senoide de 90° en volante de amplitud y periodo 2 segundos. Con esta maniobra se pretende simular la fase inicial de un volantazo.

3.2. Resultados de las simulaciones

En las maniobras de radio constante, con radio 20 metros, idéntico al de los ensayos, se han considerado velocidades comprendidas entre 10 y 40 km/h, lo que proporciona aceleraciones laterales comprendidas entre 0.4 y 6.5 m/s². Realizando el ajuste por mínimos cuadrados de los resultados obtenidos igual que se realizó con los datos experimentales, se ha obtenido el coeficiente de viraje para los tres estados de carga. La tabla 4 muestra los resultados. Como se puede apreciar, las diferencias son reducidas entre un estado de carga y otro, el vehículo en todos ellos es subvirador y la tendencia al aumentar la carga sobre el eje trasero es a hacerlo ligeramente menos subvirador, como era esperable desde un punto de vista teórico.

Pesos			Ensayo de giro de volante
Eje delantero	Eje trasero	Total	K_v
1535	1375	2910	0.0177
1485	2165	3650	0.0168
1520	2790	4310	0.01677

Tabla 4: Resultados de las simulaciones para la determinación del comportamiento virador

Por otra parte, en la maniobra senoidal, uno de los parámetros más relevantes es la velocidad de guiñada variable que tiene en cuenta, por ejemplo el ESP, para su actuación en caso de que el vehículo disponga de él. Así, se ha analizado la evolución de esta variable con los tres estados de carga y a varias velocidades. Los resultados se muestran en la tabla 5. Como se puede apreciar, el efecto de la carga a bajas velocidades no es significativo. Sin embargo, ese efecto sí es más apreciable en el caso de realizar la maniobra a mayores velocidades, donde se observa que la velocidad de guiñada crece según se aumenta la carga.

Pesos			Ensayo de giro de volante		
Eje delantero	Eje trasero	Total	Velocidad de guiñada (°/s)		
			V = 40 km/h	V = 70 km/h	V = 100 km/h
1535	1375	2910	9.55	14.8	18.6
1485	2165	3650	9.53	15.12	19.58
1520	2790	4310	9.5	15.16	19.93

Tabla 5: Resultados de las simulaciones ante una entrada de volante senoidal

4. CONCLUSIONES

En primer lugar, cabe indicarse que los ensayos se han realizado sobre una muestra reducida de vehículos, lo que limita la posibilidad de extrapolar resultados aunque se aprecian algunas tendencias en los resultados. Por otra parte, se han desarrollado sólo maniobras en las que pudiese alcanzarse una buena repetibilidad y en condiciones de seguridad. Sin embargo, sí se han podido extraer algunas conclusiones:

- El efecto de la carga penaliza la capacidad de frenado sobre todo cuando se trata de situaciones de sobrecarga. En este sentido, las furgonetas son vehículos más propensos a sufrir fuertes variaciones de carga frente a los turismos.
- La actuación del ABS mejora significativamente los resultados frente a la situación en la que el vehículo no esté dotado del sistema. Este aspecto puede resultar crítico desde un punto de vista accidentalógico dado que las furgonetas disponen de menos sistemas de seguridad activa y pasiva que los turismos [5].
- No se ha encontrado una tendencia clara en cuanto al comportamiento virador al modificar la carga.

Con el fin de complementar los ensayos anteriores, se han desarrollado simulaciones con un programa que reproduce la dinámica vehicular. En concreto, se ha analizado el comportamiento virador con maniobras semejantes a las planteadas en los ensayos en pista, dado que éstos no ofrecieron resultados concluyentes, y se han llevado a cabo maniobras de cambio de carril, con objeto de simular el inicio de una hipotética pérdida de control. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El aumento de la carga reduce ligeramente el carácter subvirador del vehículo, aunque no de una forma relevante
- A velocidades altas, la velocidad de guiñada registrada en una maniobra de cambio de carril aumenta si aumenta la carga

En resumen, los resultados obtenidos muestran diferencias en el comportamiento en frenado y direccional de los vehículos cuando se modifica la carga, sobre todo, cuando esta variación es importante. Esto apoya la consideración de una amplia mayoría de conductores de que los vehículos se comportan de forma diferente en vacío o cargados. Por otra parte, los ensayos realizados no permiten diferenciar de forma concluyente el comportamiento diferente entre turismos y furgonetas, si bien algunas características de éstas, como su centro de gravedad más elevado, permiten justificar esta percepción de los conductores.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Desarrollo y aplicación de una metodología integrada para el estudio de los accidentes de tráfico con implicación de furgonetas. FURGOSEG” (P24/08) subvencionado por el Ministerio de Fomento.

6. REFERENCIAS

- [1] F. Aparicio, C. Vera, V. Diaz. *Teoría de los vehículos automóviles*. Sección de Publicaciones de la ETSI Industriales de la UPM (2001)
- [2] F. Jiménez. *Analysis of the vehicle dynamics using advanced instrumentation*. 7th FISITA Student Congress. Barcelona, España, (2004)
- [3] C.E. *Frenado. Directiva 71/320/CEE-98/12 CE*. Diario Oficial de la Comunidad Europea. N° L 202/37 (1998)
- [4] International Organization for Standardization. *Passenger cars – Steady-state circular driving behavior – Open-loop test procedure*. Norma ISO 4138. (1996)
- [5] F. Jiménez, A. Furones, M. Aguilar, V. del Pozo, F. Aparicio. *Estimate of the influence on safety of vans renewal in Spain*. 13th EAEC European Automotive Congress. Valencia, España, (2011)