

# Metodología experimental para determinar el coeficiente de amortiguamiento del sistema de suspensión de un vehículo

**A. Navarro Arcas, E. Velasco Sánchez, S. Sánchez Mateo, M. M. Paricio Caño,  
M. Sánchez Lozano**

*Dpto de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández*  
abel.navarro@umh.es

---

La inspección en la Inspección Técnica de Vehículos (ITV) del sistema de suspensión resulta compleja ante la imposibilidad de desmontar partes como el amortiguador.

Está demostrado que el deterioro de la suspensión es importante controlarlo bien pues es crítico para la dinámica y comportamiento del vehículo. Autores como Velasco y Calvo, en sus Tesis Doctorales han abundado en el problema de determinar un criterio de rechazo en ITV y evaluar el estado de la suspensión.

En esa línea el presente trabajo propone una metodología, aplicable en ITV, que permita identificar y modelar la suspensión de un vehículo. Se propone un método de ensayo que proporciona los parámetros característicos de la suspensión, masas, rigideces y amortiguamiento, considerando el modelo de  $\frac{1}{4}$  de vehículo. El ensayo es factible en el proceso de inspección de ITV y con un banco similar a los actualmente utilizados.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La inspección en la Inspección Técnica de Vehículos (ITV) del sistema de suspensión resulta compleja ante la imposibilidad de desmontar partes como el amortiguador.

Está demostrado que amortiguador varía sus prestaciones a lo largo de la vida del vehículo afectando a la maniobrabilidad y distancia de frenado en pruebas dinámicas.

El presente trabajo propone una metodología general para deducir los parámetros de la suspensión de un vehículo automóvil a partir de los datos obtenidos del desplazamiento de una plataforma que excita a  $\frac{1}{4}$  de vehículo verticalmente a una frecuencia y amplitud determinadas, y desplazamientos, velocidades y aceleraciones de las masas suspendida y no suspendida mediante un sistema de adquisición de datos basado en el procesamiento de imágenes captadas con una cámara de alta velocidad y un software de tratamiento de estas imágenes.

El ensayo podría ser factible en el proceso de inspección de ITV y con un banco similar a los actualmente utilizados.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Para desarrollar este trabajo se ha utilizado un modelo simplificado del sistema de suspensión, de 2 grados de libertad de un  $\frac{1}{4}$  de vehículo, puesto que consierar esta parte respecto al vehículo completo no varía en los datos finales de forma significativa [3]. Se ha despreciado el coeficiente de amortiguación del neumático ya que es del orden de un 5% respecto a la rigidez del neumático, lo cual hace poco significativa su intervención.

También se ha considerado un comportamiento lineal del amortiguador. Esto se justifica por la existencia de estudios que corroboran que este modelo de amortiguador es suficiente para analizarlo desde el punto de vista de la seguridad [4].

Dicho modelo se representa en la figura 1, donde:

- $M_c$ : masa suspendida
- $K_c$ : rigidez del resorte de la suspensión
- $B_c$ : amortiguamiento de la suspensión
- $M_r$ : masa no suspendida
- $K_r$ : rigidez del neumático
- $X_2$ : desplazamiento de la masa suspendida
- $X_1$ : desplazamiento de la masa no suspendida
- $U$ : desplazamiento de la plataforma

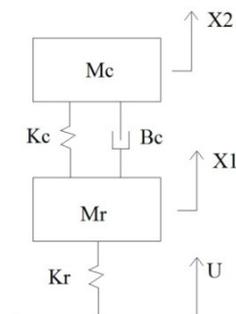


Figura 1. Modelo de 2 g.d.l

Desarrollando el modelo mediante el diagrama del sólido libre se obtienen las siguientes ecuaciones 1 y 2.

$$M_r \cdot \ddot{x}_1 + B_c \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_c \cdot (x_1 - x_2) + K_r \cdot (x_1 - u) = 0 \quad (1)$$

$$M_c \cdot \ddot{x}_2 + B_c \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_c \cdot (x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

Para resolver el modelo planteado se ha utilizado el software Matlab/Simulink, por su facilidad de desarrollo y aplicación.

El ensayo que realizan la mayoría de los bancos de suspensiones actuales consiste en excitar la suspensión desde la plataforma en la que se apoya la rueda del vehículo mediante un desplazamiento senoidal de amplitud 3 mm y frecuencia de 16 Hz.

Esta excitación se mantiene durante 2 segundos para posteriormente permitir que el sistema se amortigüe libremente en 8 segundos aproximadamente oscilando con la misma amplitud, debido a la inercia del propio banco de ensayos.

En este modelo se ha desestimado reproducir fielmente el citado ensayo para evitar los regímenes transitorios, que complican el modelo matemático a favor de ensayos a régimen estacionario que facilitan el modelo y es fácilmente aplicable en bancos actuales mediante la aplicación de variadores de frecuencia. Se introducirá una excitación senoidal forzada de 3 mm de amplitud a frecuencia constante, en este caso 2,7Hz, conforme a la ecuación 3.

$$U = A \sin(\omega t) + \varphi \quad (3)$$

Los parámetros utilizados en el modelo se obtuvieron experimentalmente, a partir un vehículo utilitario (Peugeot 207), para poder contrastar los resultados con el ensayo experimental posteriormente.

- $K_c=58530$  N/m
- $K_r=228600$  N/m
- $M=375$  Kg

El valor de  $B_c$  que se ha propuesto es un valor de bibliografía acorde con las características de la suspensión ( $B_c=3000$  N·s/m).

También se han estimado valores para  $M_c$  y  $M_r$ , tomando como hipótesis que  $M_r$  es aproximadamente un 20% del valor de  $M_c$ , dando lugar a ecuación 4:

$$M = M_c + M_r \quad (4)$$

$$M_c = 0,8 M = 300 \text{ kg}; \quad M_r = 0,2 M = 75 \text{ kg}$$

Introduciendo los datos de partida en el modelo de Matlab se obtuvieron las siguientes gráficas:

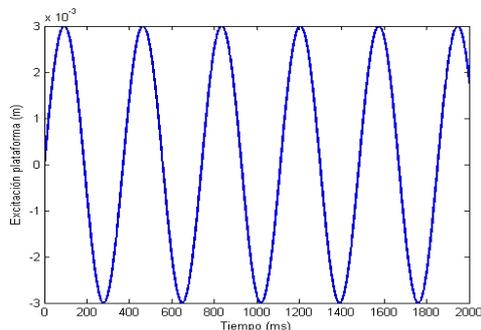


Figura 2. Excitación plataforma

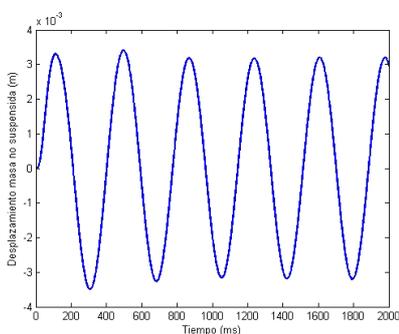


Figura 3. Desplazamiento masa no suspendida

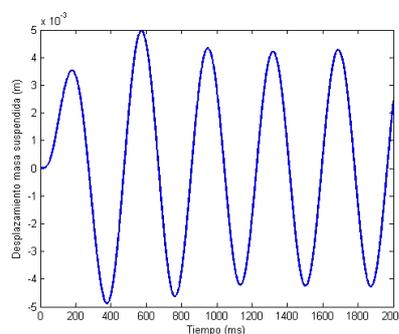


Figura 4. Desplazamiento masa suspendida

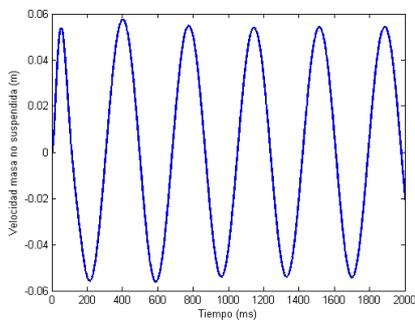


Figura 5. Velocidad masa no suspendida

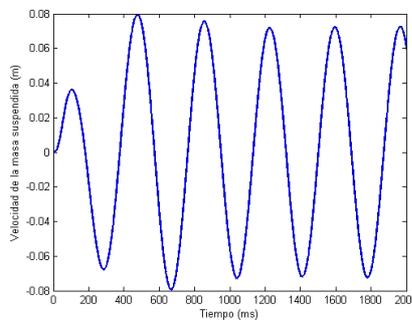


Figura 6. Velocidad masa suspendida

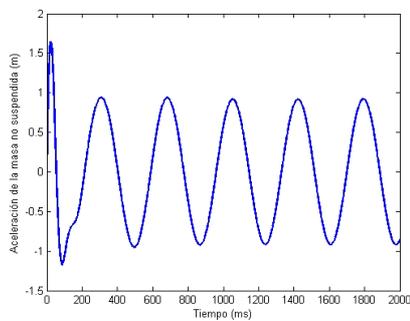


Figura 7. Aceleración masa no suspendida

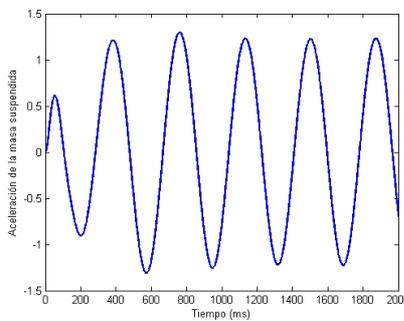


Figura 8. Aceleración masa suspendida

### 3. MODELO ALGEBRAICO

El primer objetivo que se plantea es determinar todos los parámetros del modelo de suspensión de un  $\frac{1}{4}$  de vehículo mediante un ensayo sencillo, rápido y eficaz de un vehículo real, sin tener que desmontar ningún elemento del mismo.

El modelo matemático planteado de forma matricial, considerando incógnitas los parámetros del modelo queda de este modo:

$$[A] \cdot [B] = [C] \quad (5)$$

$$A = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t_1) & 0 & \dot{x}_1(t_1) - \dot{x}_2(t_1) & x_1(t_1) - x_2(t_1) & x_1(t_1) - u(t_1) \\ 0 & \ddot{x}_2(t_1) & \dot{x}_2(t_1) - \dot{x}_1(t_1) & x_2(t_1) - x_1(t_1) & 0 \\ \ddot{x}_1(t_2) & 0 & \dot{x}_1(t_2) - \dot{x}_2(t_2) & x_1(t_2) - x_2(t_2) & x_1(t_2) - u(t_2) \\ 0 & \ddot{x}_2(t_2) & \dot{x}_2(t_2) - \dot{x}_1(t_2) & x_2(t_2) - x_1(t_2) & 0 \\ g & g & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{pmatrix} Mr \\ Mc \\ Bc \\ Kc \\ Kr \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ M \cdot g \end{pmatrix} \quad (8)$$

De esta forma se tiene cinco incógnitas ( $Mr$ ,  $Mc$ ,  $Bc$ ,  $Kc$ ,  $Kr$ ), dos ecuaciones del modelo (1) y (2) y la ecuación de la suma de las masas (4).

Para resolver el sistema es necesario escoger dos instantes de tiempo cualesquiera, extraer los datos correspondientes a las amplitudes de los desplazamientos de la plataforma, masa no suspendida y masa suspendida, así como la velocidad y aceleración de las masas mencionadas. A continuación se introducen estos datos como datos conocidos en el sistema de ecuaciones (6), obteniendo un sistema de ecuaciones algebraicas con los valores de los instantes  $t_1$  y  $t_2$  (5).

Se puede apreciar un régimen transitorio al inicio en las gráficas obtenidas, por tanto, se escogerán puntos de las gráficas cuando el comportamiento se muestra más estabilizado, por ejemplo, en los instantes  $t_1=1,5$  s y  $t_2=1,8$  s.

Resolviendo el sistema de ecuaciones algebraicas resultante, se obtienen los parámetros de la suspensión, comprobando que, matemáticamente, el modelo es válido.

Parámetros de la suspensión	Valores calculados Modelo matemático	Valores reales	Diferencias
$Mr$	75Kg	75 Kg	0%
$Mc$	300 Kg	300 Kg	0%
$Bc$	3000 N.s/m	3000 N.s/m	0%
$Kc$	58530 N/m	58530 N/m	0%
$Kr$	228600 N/m	228600 N/m	0%

Tabla 1. Parámetros de la suspensión

Con la metodología propuesta se puede determinar los parámetros de la suspensión midiendo los desplazamientos de las masas con una excitación conocida a una frecuencia conocida y la masa total de cada rueda.

#### 4. EQUIPOS, SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y PARÁMETROS MEDIDOS

Para la realización de los ensayos experimentales se ha contado con:

- Banco de ensayos de ITV, fabricante RYME, modelo PCR-NET. Este dispositivo será el que introduzca la amplitud correspondiente a la excitación inicial.
- Variador de frecuencia vectorial, marca Toshiba, modelo TOSVERT VF-S11. Utilizado para conseguir regímenes estacionarios a baja frecuencia con suficiente par.
- Cámara de alta velocidad, marca Weinberger Deltronics, modelo SpeedCam Pro con la que se grabó vídeo a 500 fps.
- Software “Tema 2.0”. Procesamiento de imágenes y extracción las gráficas/datos del desplazamiento de distintas dianas respecto al tiempo.
- Mantas de pesaje calibradas para pesar el  $\frac{1}{4}$  de vehículo y como apoyo al cálculo de las rigideces del sistema.
- Máquina de ensayos universal en modo compresión para medir la rigidez a compresión del neumático.



Figura 9. Detalles de los equipos y sistema de adquisición de datos

#### 5. PARÁMETROS MEDIDOS

El sistema de reconocimiento de imágenes es adecuado para “seguir” dianas de una forma determinada tal como aparece en la figura 9. El software empleado procesa imágenes provenientes de la cámara de alta velocidad registrando los datos/gráficas referentes a los desplazamientos de las dianas seleccionadas.

En el ensayo mostrado, se introduce una excitación senoidal forzada de 3 mm de amplitud y el variador de frecuencia se regula para que la plataforma se excite a 2,7 Hz, resultando las gráficas mostradas en la figura 10.

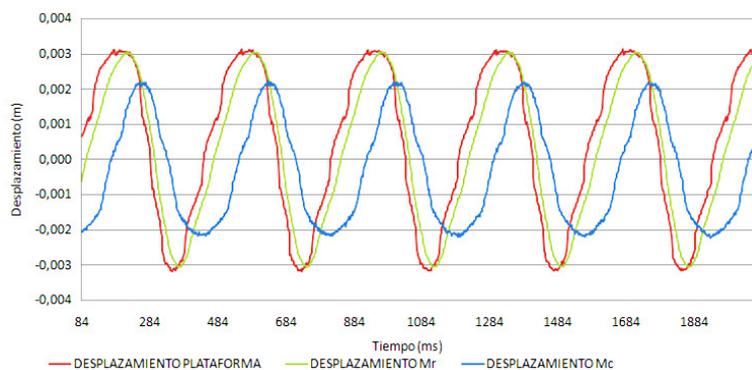


Figura 10. Superposición de los desplazamientos captados con el sistema de adquisición de datos de la plataforma, Mr y Mc

Se observa que la excitación de la plataforma no obedece a una función senoidal perfecta como en el modelo matemático. Se entiende que puede ser debido a que a bajas frecuencias, el motor-variador del banco de ensayos, carece del suficiente par para lograr el efecto deseado. Se aprecia que el tiempo de subida de la plataforma es mayor que el de bajada debido al esfuerzo que supone vencer el peso.

Para poder trabajar con los datos/gráficas obtenidos se “idealizan” estos desplazamientos para asimilarlos lo mejor posible a funciones senoidales, que son con las que opera el modelo algebraico. Éstas se obtendrán extrayendo las amplitudes y desfases de las gráficas experimentales, quedando las gráficas de los desplazamientos de la plataforma, masa no suspendida y masa suspendida como se muestra en la figura 11.

Las ecuaciones que se utilizan para “idealizar” los desplazamientos, velocidades y aceleraciones son las que se muestran en la tabla 2.

Parámetros	Valores de partida	Ecuaciones
$A_u$ (Amplitud plataforma)	0,003 m	$X_u = A_u \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_u)$
$\varphi_u$ (Desfase plataforma)	-0,301914937 rad	
$A_1$ (Amplitud Mr)	0,003067 m	$X_1 = A_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_1)$ $X'_1 = A_1 \cdot \omega \cdot \text{cos}(\omega \cdot t + \varphi_1)$ $X''_1 = -A_1 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_1)$
$\varphi_1$ (Desfase Mr)	-0,637375978 rad	
$A_2$ (Amplitud Mc)	0,0022305 m	
$\varphi_2$ (Desfase Mc)	-1,610212999 rad	$X_2 = A_2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_2)$ $X'_2 = A_2 \cdot \omega \cdot \text{cos}(\omega \cdot t + \varphi_2)$ $X''_2 = -A_2 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_2)$
F (frecuencia)	2,669514148 Hz	
$\omega$ (frecuencia)	16,77305207 rad/s	

Tabla 2. Parámetros medidos y ecuaciones utilizadas

En la figura 11, se pueden apreciar los desplazamientos “idealizados” que las tres dianas colocadas sobre la plataforma, masa no suspendida y masa suspendida, en teoría deberían presentar.

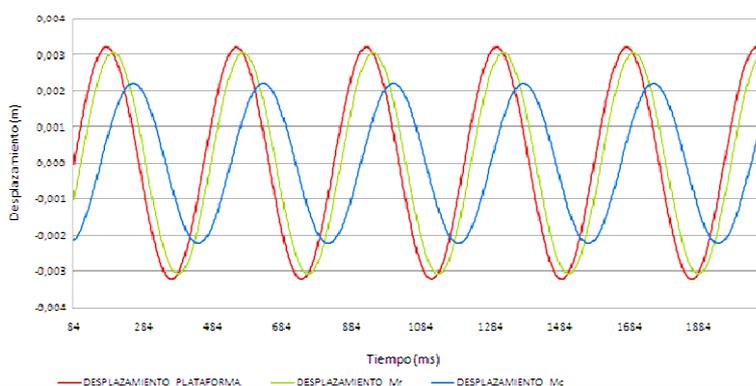


Figura 11. Superposición de los desplazamientos “idealizados” de la plataforma, Mr y Mc

Del mismo modo que se procede con las correspondientes a las velocidades y aceleraciones.

### 6. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestra la superposición de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la masa no suspendida y masa suspendida.

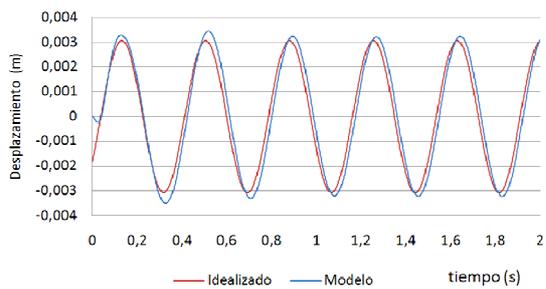


Figura 12. Desplazamiento masa no suspendida

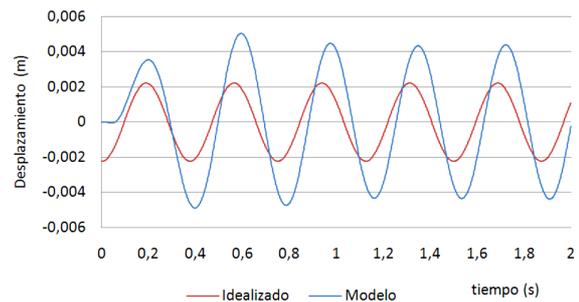


Figura 13. Desplazamiento masa suspendida

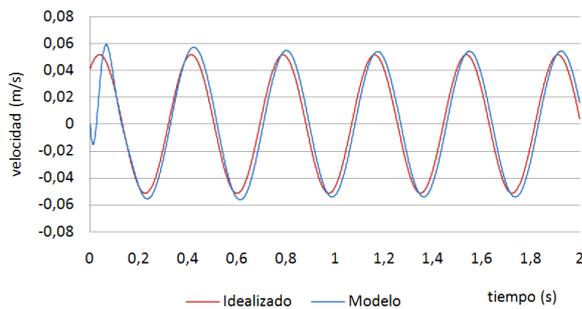


Figura 14. Velocidad masa no suspendida

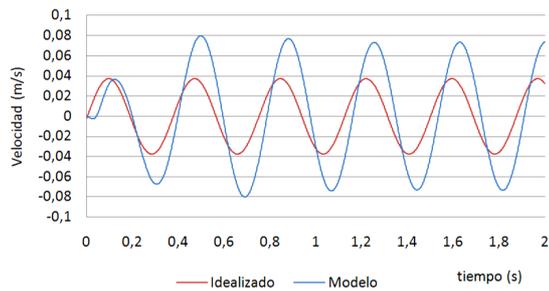


Figura 15. Velocidad masa suspendida

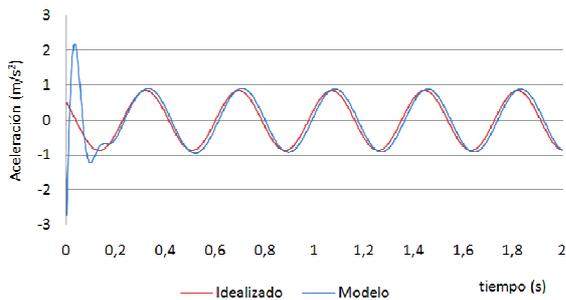


Figura 16. Aceleración masa no suspendida

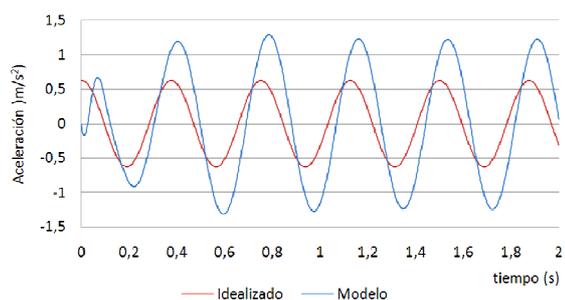


Figura 18. Aceleración masa suspendida

## 7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A la vista de los resultados en forma de gráficas, se puede deducir que existen diferencias significativas entre el modelo planteado y los gráficas idealizadas provenientes de los datos experimentales. Estas diferencias pueden ser debidas a:

- La suposición del comportamiento lineal del amortiguador, dado que su comportamiento es diferente a tracción y a compresión.
- No haber tenido en cuenta el amortiguamiento del neumático en el modelo.
- Suposición del dato del amortiguador (3000 N·s/m). Una variación de este dato significa desfases significativos y por tanto variación de los resultados.
- Suposición del reparto de masas (80-20), que es posible que no sea de este modo y el comportamiento puede verse afectado.
- Errores de precisión del sistema de adquisición de datos (cámara de alta velocidad) y del posterior procesamiento de los datos en el software. Hay que tener en cuenta que el software reconoce pixels y a cierta distancia un pixel puede ser un error significativo.

## 8. FUTUROS TRABAJOS Y LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El objetivo principal es determinar si la suspensión del vehículo completo cumple unos requisitos mínimos de seguridad, lo cual es objeto de estudio con mayor profundidad y sobre que estamos trabajando actualmente.

Desde la línea de investigación abierta actualmente, se realizará un estudio de vehículo completo para verificar cómo influye la rigidez y amortiguamiento de todo el vehículo sobre el cuarto de vehículo objeto de estudio.

Dado que pequeñas variaciones en el amortiguador conllevan diferencias significativas en cuanto al desfase en gráficas, no se podrá despreciar el amortiguamiento del neumático, a la vez que se completará el modelo con las curvas correspondientes al comportamiento de un amortiguador real.

Con todo, se realizará un análisis de sensibilidad, variando los parámetros del sistema, que son, la masa no suspendida, la masa suspendida, la rigidez del resorte y del neumático y el amortiguamiento del sistema. Con estos datos se tratará de encontrar el sistema que haga posible determinar los parámetros de la suspensión de un vehículo y establecer un criterio de aceptación y rechazo para su aplicación en ITV en un tiempo razonable.

## 9. REFERENCIAS

- [1] E. Velasco Sánchez, *Criterio de inspección en bancos de ensayo del sistema de suspensión de un vehículo automóvil*, Tesis Doctoral. Universidad Carlos III, Madrid, España, (1997).
- [2] J. A. Calvo Ramos, *Determinación de un criterio de inspección para verificar el comportamiento dinámico del sistema de suspensión de un vehículo automóvil*, Tesis Doctoral. Universidad Carlos III, Madrid, España, (2003).
- [3] F. Aparicio, C. Vera and V. Díaz, *Teoría de los vehículos automóviles*, ETS Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, (1995).
- [4] J. A. Calvo Ramos, M. J. López Boada, E. Olmeda Santamaría, J. L. San Román García, *Influencia del modelo de amortiguador en la simulación del sistema de suspensión de un vehículo*, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, (2007).
- [5] E. Velasco Sánchez, V. Díaz López, *Inspección de suspensiones de vehículos en ITV mediante la utilización combinada de bancos de suspensiones y frenómetro*, XII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, (1998).