



Seminario **Patrimonio Vial, Transporte y Logística**

El pesaje de vehículos en movimiento. Aspectos generales y experiencia en España

Jesús María Leal Bermejo

Centro de Estudios del Transporte – CEDEX - Ministerio de
Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA)

- E-mail: Jesus.Leal@cedex.es

El Pesaje en movimiento de vehículos (WIM: Weigh-in-Motion)

- Definición y aplicaciones
- Componentes de un sistema WIM de pesaje dinámico
- Clasificación y tecnologías de los sensores de peso
- Factores de influencia en la precisión de los sistemas WIM
- Normativa técnica sobre el pesaje dinámico de vehículos
- Comparación de diversas tecnologías WIM
- Experiencia en España en el pesaje dinámico de vehículos

Definición de pesaje dinámico de vehículos (WIM: Weigh-in-Motion)

- Pesaje dinámico de alta velocidad (o simplemente pesaje dinámico) (en inglés: High-Speed WIM o HS-WIM):

Es el proceso de estimar el peso de un vehículo y de sus ejes cuando está circulando a su velocidad normal de recorrido, sin interferir en el tráfico rodado de la carretera, a través de la medición y el análisis de las fuerzas dinámicas ejercidas por los neumáticos del vehículo sobre el pavimento

- Pesaje dinámico de baja velocidad (en inglés: Low-Speed WIM o LS-WIM)

Es el proceso de pesar un vehículo que se mueve lentamente generalmente en un área específica fuera de la corriente del tráfico, bajo unas condiciones controladas, tales como a una velocidad reducida (de 5 a 15 km/h) y constante para minimizar los efectos dinámicos

Comparación entre el pesaje estático y el pesaje dinámico

• Pesaje estático

- **Ventajas:**
 - Gran exactitud
 - Puede utilizarse para el control legal de los pesos de los vehículos y de sus ejes
- **Inconvenientes:**
 - Baja eficiencia: solamente se pueden pesar 20 ó 30 vehículos en una jornada de trabajo
 - Los resultados pueden estar sesgados debido a que se desvían los vehículos sobrecargados
 - Se requiere la presencia de la policía y el empleo de una cierta cantidad de personal para realizar las operaciones de pesaje

• Pesaje dinámico

- **Ventajas:**
 - Permite pesar a todos los vehículos que circulan por una carretera.
 - Tiene suficiente precisión para aplicaciones estadísticas o para la preselección de los vehículos sobrecargados
 - Funcionamiento automático e ininterrumpido

Inconvenientes:

En la mayor parte de los países se considera que la exactitud del pesaje no es suficiente para el control legal del peso de los vehículos y sus ejes

Componentes de un sistema de pesaje dinámico

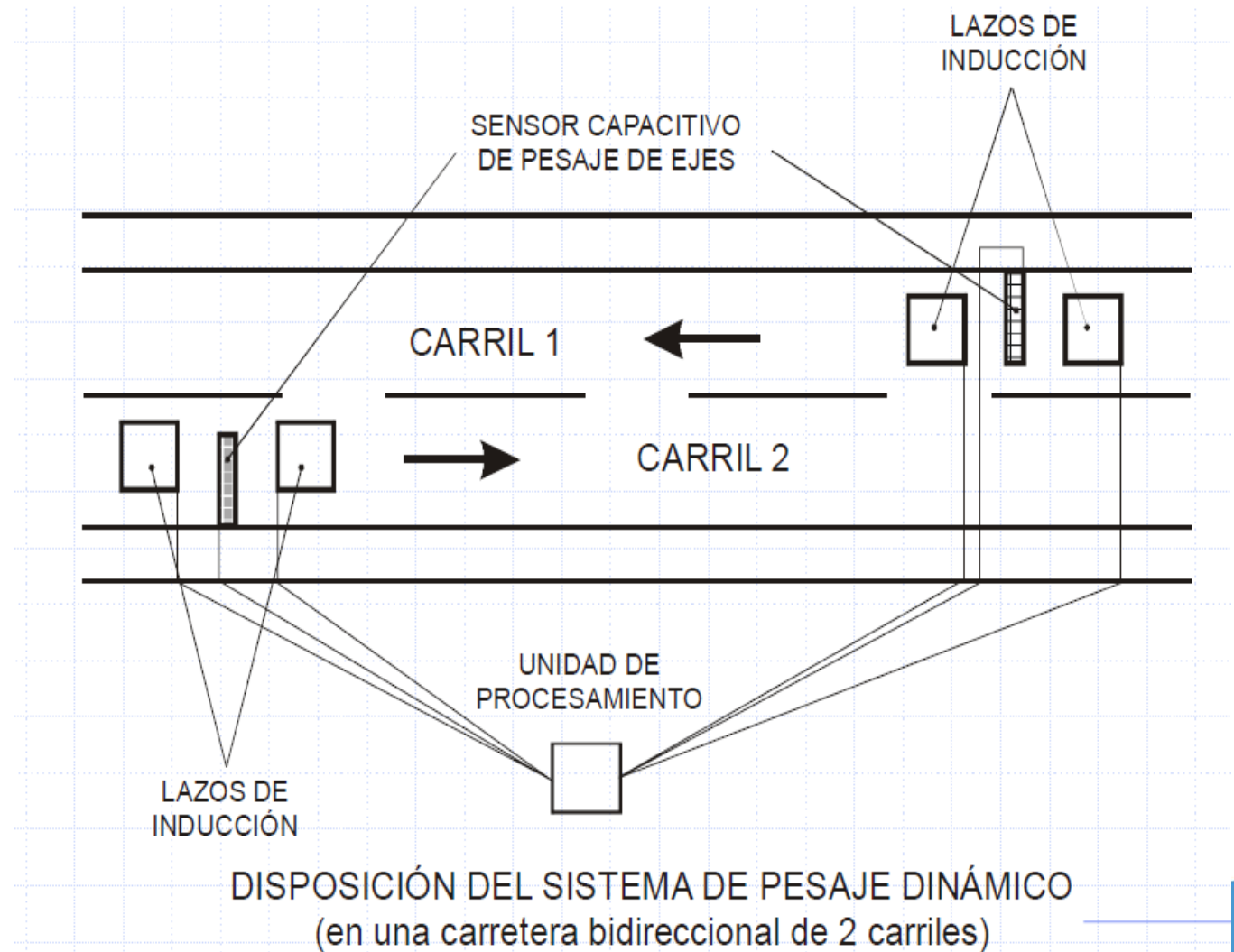
1. Sensores en la carretera

- Sensores de peso (lineales o superficiales)
- Detectores de presencia (lazos de inducción generalmente)

2. Equipo electrónico de registro, procesamiento y almacenamiento

3. Equipos auxiliares

- Baterías
- Router de transmisión de datos a distancia
- Panel solar de alimentación eléctrica



Clasificación y tecnologías de los sensores de peso

- **Sensores superficiales**

- **Placas en flexión** (bending plates) equipadas con bandas extensométricas
- **Esteras capacitivas** (formadas por dos placas metálicas conductoras separadas por un material dieléctrico, que disminuye su espesor al pasar los ejes de un vehículo)
- **Puentes de carretera** (equipados en la parte interior del tablero con bandas extensométricas) (Bridge-WIM)

- **Sensores lineales**

- **Barras piezoeléctricas**: producen una corriente eléctrica por presión de los neumáticos. Pueden ser de tres tipos: - Piezopolímeros , Piezocerámicos y Cristal de cuarzo

Los piezopolímeros y los piezocerámicos tienen una señal de respuesta muy dependiente de la temperatura, por lo que requieren un algoritmo de compensación de esta variable, mientras que la respuesta de los cristales de cuarzo es muy constante, aunque son mucho más caros.

- **Barras equipadas con pequeñas células de carga**

- **Sensores de fibra óptica**

Factores de influencia en la precisión de los sistemas de pesaje dinámico

1. Interacción vehículo-pavimento

Las irregularidades del pavimento excitan la suspensión del vehículo cuando éste circula sobre aquél, provocando una componente dinámica de la fuerza ejercida por las ruedas del vehículo sobre el sensor de pesaje (véanse las figuras)

2. Factores relativos al sistema de pesaje

- Defectos o discontinuidades del sensor de peso
- Mal ajuste de la unidad electrónica de procesamiento en relación con las señales de los sensores
- Problemas de instalación

3. Calibración del sistema de pesaje

- Calibración estáticas (con gatos hidráulicos o prensas)
- Calibración dinámica (con vehículos circulando)
- Algoritmos de autocalibración

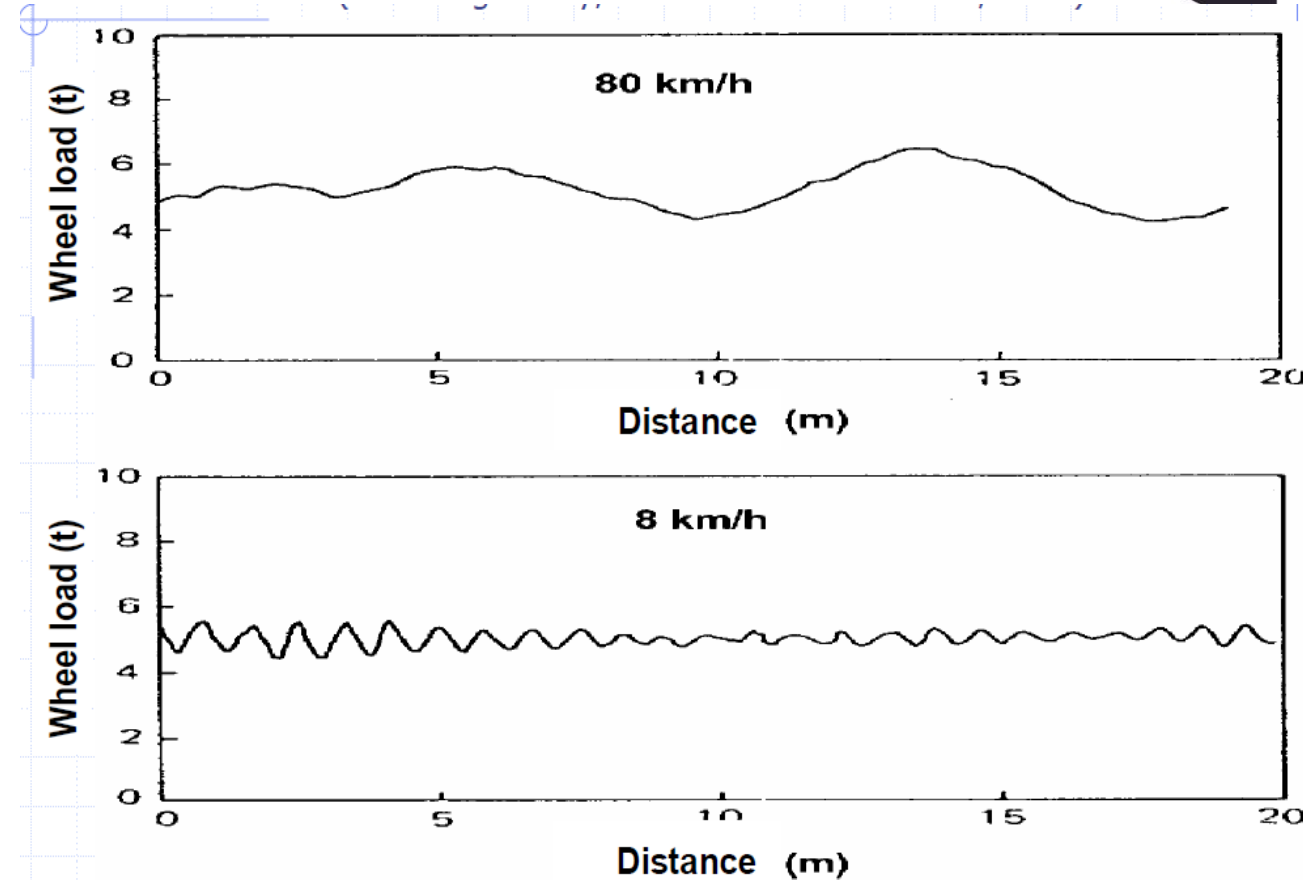


Figura: Variaciones de la carga ejercida por la rueda de un vehículo a diferentes velocidades
(Fuente. TRL, UK, 1991)

Normativa sobre el pesaje dinámico en el mundo

- Principales normas y recomendaciones:
 - **European WIM Specifications** (elaboradas por el comité COST 323)
 - **Norma de Estados Unidos ASTM E 1318 - 09** “Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and test Methods”
 - **International Recommendation OIML R134-1 (2006)** “Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. Part 1: Metrological and technical Requirements-Tests”
- Aspectos tratados en las normas WIM:
 - Definición de varias clases de sistemas WIM en relación con sus aplicaciones
 - Establecimiento de los requisitos de exactitud mínimos para cada clase
 - Definición de las condiciones mínimas de la carretera para colocar un sistema WIM:
 - Condiciones geométricas: mínimo radio de las curvas, máximas pendientes
 - Condiciones superficiales del pavimento: máxima profundidad de roderas, regularidad superficial (IRI)
 - Condiciones estructurales del pavimento: deflexiones máximas bajo carga
 - Establecimiento de unos procedimientos de calibración del sistema de pesaje dinámico
 - Definición de unos métodos de ensayo para comprobar las prestaciones de los sistemas WIM

Explicación de algunos aspectos de la normativa sobre pesaje dinámico

- No se trata de normas de producto, sino de recomendaciones de ensayo para verificar las prestaciones y el funcionamiento de los sistemas WIM, así como de la clasificación de estos sistemas según su nivel de precisión.
- Un aspecto muy importante es que todas ellas recogen unos requisitos sobre las **características mínimas que tiene que cumplir el firme y la carretera en general para asegurar un buen funcionamiento** de los sistemas WIM instalados en ella.
- A mayor precisión del sistema WIM a instalar, mejores características debe tener el pavimento para asegurar el nivel de precisión nominal.
- Las Especificaciones Europeas WIM están más adaptadas a la definición y evaluación de ensayos de sistemas de pesaje dinámico, mientras que la Norma de ASTM E 1318 está más adaptada para escoger un cierto sistema de pesaje según la aplicación que se vaya a dar a los resultados obtenidos con él.
- Estas dos normas **establecen la precisión del sistema de forma estadística**, dando el porcentaje de pesadas cuyo error debe mantenerse en un cierto intervalo **para aproximadamente el 95% de las mediciones**.
- La Recomendación de la OIML R-134 está más adaptada para establecer la aptitud de un sistema WIM que se vaya a utilizar para el control legal directo de pesos. Por tanto, las tolerancias se dan como el **máximo error permitido para cada clase**, es decir, que el **100% de las mediciones deben mantenerse en el intervalo prescrito**.

European WIM Specifications: clases de precisión de los sistemas WIM y clasificación de los emplazamientos donde se puede instalar un sistema de pesaje dinámico

Tabla 1- Clases de precisión de los sistemas WIM

Criterios (tipo de medida)	Dominio de aplicación	Clases de precisión: Anchura del intervalo de confianza δ (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
1. Peso total	Peso Total >35KN	5	7	10	15	20	25	>25
Carga por eje:	Carga por eje >20KN							
2. Eje múltiple		7	10	13	18	23	28	>28
3. Eje simple		8	11	15	20	25	30	>30
4. Eje de un grupo		10	14	20	25	30	35	>35
Velocidad		2	3	4	6	8	10	>10
Distancia entre ejes		2	3	4	6	8	10	>10
Intensidad total de circulación		1	1	1	3	4	5	>5

Tabla 2. Clases de emplazamientos donde se puede instalar un sistema WIM y características superficiales y estructurales del firme

			Clases de emplazamientos para pesaje en movimiento		
			I EXCELENTE	II BUENO	III ACCEPTABLE
Roderos (regla de 3 m)		Profundidad máxima de roderos (mm)	≤ 4	≤ 7	≤ 10
Deflexión (cuasiestática) (eje – 130KN)	Firmes semirrígidos	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 15	≤ 20	≤ 30
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 3	± 5	± 10
	Firmes totalmente bituminosos	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 20	≤ 35	≤ 50
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 4	± 8	± 12
	Firmes flexibles	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 30	≤ 50	≤ 75
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 7	± 10	± 15
Deflexión (dinámica) (carga – 50 KN)	Firmes semirrígidos	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 10	≤ 15	≤ 20
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 2	± 4	± 7
	Firmes totalmente bituminosos	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 15	≤ 25	≤ 35
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 3	± 6	± 9
	Firmes flexibles	Deflexión media (10^{-2} mm)	≤ 20	≤ 35	≤ 55
		Diferencia izq/dch (10^{-2} mm)	± 3	± 6	± 9
Regularidad superficial	Índice IRI APL	Índice (m/km)	0 - 1,3	1,3 - 2,6	2,6 - 4
	APL ⁽¹⁾	Notas ⁽¹⁾ (SW, MW, LW)	9-10	7-8	5-6

Norma ASTM E 1318: clases de precisión de los sistemas WIM y clasificación de los emplazamientos donde se puede instalar un sistema de pesaje dinámico.

Tabla 3. Clases de precisión de la norma de los sistemas WIM.

Los sistemas de tipo I y II están dirigidos a la obtención de datos estadísticos de pesos y cargas por eje, los de tipo III para la preselección de vehículos sobrecargados, y los de tipo IV se refieren a sistemas de baja velocidad (LS-WIM) para el control legal directo de pesos.

Función	Tolerancia para un 95% de probabilidad de conformidad				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Valor \geq (kg) ^A	Tolerancia \pm (kg)
Carga por rueda	$\pm 25 \%$		$\pm 20 \%$	2.300	100
Carga por eje	$\pm 20 \%$	$\pm 30 \%$	$\pm 15 \%$	5.400	200
Carga por eje múltiple	$\pm 15 \%$	$\pm 20 \%$	$\pm 10 \%$	11.300	500
Peso bruto del vehículo	$\pm 10 \%$	$\pm 15 \%$	$\pm 6 \%$	27.200	1.100
Velocidad	2 Km/h				
Separación entre ejes	0,15m				

Condiciones de la vía	Tipo de sistema			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Radio de curvatura (m)	>1.700			
Pendiente longitudinal	$\leq 2 \%$	$\leq 2 \%$	$\leq 2 \%$	$\leq 1 \%$
Pendiente transversal	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 1 \%$
Anchura de carril (m)	de 3,6 m a 4,3 m			
Regularidad superficial	Utilizando la regla de 6 m, no deberá pasar por debajo de ella una placa de 150 ,mm de diámetro y 3 mm de grosor			

Recomendaciones OIML R134-1 : Clases de precisión de los sistemas WIM en la determinación del peso total del vehículo y de los ejes

Tabla 5. Máximo error permitido según la clase del sistema WIM

Clase de precisión para la masa del vehículo	Porcentaje del valor convencional de la masa del vehículo	
	Verificación inicial	Comprobación en servicio
0,2	± 0,10 %	± 0,20 %
0.5	± 0,25 %	± 0,50 %
1	± 0,50 %	± 1,00 %
2	± 1,00 %	± 2,00 %
5	± 2,50 %	± 5,00 %
10	± 5,00 %	± 10,00 %

Tabla 6. Máximo error permitido para el peso de los ejes simples de un vehículo según la clase de precisión del sistema WIM

Clase de precisión para la carga por eje simple	Porcentaje del valor verdadero convencional de la carga estática de referencia del eje simple	
	Verificación inicial	Comprobación en servicio
A	± 0,25 %	± 0,50 %
B	± 0,50 %	± 1,00 %
C	± 0,75 %	± 1,50 %
D	± 1,00 %	± 2,00 %
E	± 2,00 %	± 4,00 %
F	± 4,00 %	± 8,00 %

Precisiones que pueden obtener los diferentes tipos de sistemas de pesaje dinámico

- Las mejores precisiones aproximadas que se suelen obtener con sistemas de pesaje dinámico de cada tipo, al medir el **peso bruto de los vehículos**, instalados en un pavimento de características excelentes según las European WIM Specifications, para un 95% de las mediciones, son las siguientes:
- Sistemas portátiles: $\pm 20\%$
- Sistemas fijos:
 - Piezoeléctricos de tipo piezopolímero: $\pm 15\%$
 - Piezoeléctricos de tipo piezocerámico: $\pm 10\%$
 - Piezoeléctricos de cuarzo: $\pm 5\%$
 - Placas en flexión (bending plates): $\pm 5\%$
 - Bridge-WIM: $\pm 10\%$
 - Esteras capacitivas (en instalación fija): $\pm 10\%$

Experiencia sobre el pesaje dinámico en España

1. Estudios del tráfico y de los pesos de los vehículos pesados en la red nacional de carreteras utilizando básculas dinámicas portátiles, realizados por el CEDEX entre 1987 y 2003.
2. Entre 2008 y 2010 el CEDEX realizó un ensayo para verificar las precisiones y el funcionamiento de varios sistemas permanentes de pesaje dinámico de tipo piezoeléctrico, en un tramo de la autovía A-5 en Badajoz, junto a la frontera con Portugal
3. Instalación de sistemas permanentes de pesaje dinámico:
 - Actualmente hay unos 10 sistemas de pesaje dinámico en funcionamiento en la red nacional de carreteras, la mayor parte de ellos de tipo piezoeléctrico.
 - La mayor parte de estos sistemas WIM están dedicados a la preselección de vehículos sobrecargados, los cuales son desviados desde la carretera a un área de pesaje estático provista de un puente-báscula estático, utilizado para el control legal de los pesos.
 - En España no se permite el empleo de básculas dinámicas de baja velocidad (LS-WIM) para el control legal de pesos, sólo están autorizadas para ello las básculas de pesaje estático

Campañas de pesaje dinámico en la red nacional de carreteras (Red de Carreteras del Estado), realizadas por el CEDEX entre 1987 y 2003

- Se utilizaron varias básculas dinámicas portátiles de tipo capacitivo para medir los pesos brutos de los camiones y las cargas por eje en más de 250 emplazamientos de la red nacional de carreteras (26.000 km)
- Además de los datos recogidos automáticamente por las básculas dinámicas portátiles, se registraron visualmente mediante operarios entrenados, otros datos de los vehículos (número de matrícula, presencia de ejes levantados o el tipo de ruedas (sencillas o gemelas).

Instalación de los sistemas
WIM portátiles del CEDEX en
cada tramo estudiado



• Resultados

- De media, el 20% de los vehículos iban sobrecargados, aunque sólo estaban sobrecargados el 9% de los ejes
- En general no había problemas graves de sobrecarga, excepto en algunos tramos de carretera determinados (cerca de minas o de obras de carreteras, etc.)
- El Factor de Equivalencia medio (en ejes simples de 13 t) por vehículo pesado era de: 0,6 ejes de 13 t por vehículo pesado para firmes flexibles (exponente de la ley de fatiga $\alpha = 4$) y también de 0,6 ejes de 13 t por vehículo pesado para firmes semirrígidos (exponente de la ley de fatiga $\alpha = 8$).
- Estos resultados se utilizaron para el desarrollo de la actual norma de proyecto de firmes de carretera (Norma 6.1-IC)

Estudios experimentales sobre el efecto de los pesos de los camiones sobre el pavimento, realizados por el CEDEX

- Instalación de un sistema de pesaje dinámico en la A-62 como parte de una estación automática de auscultación de pavimentos, con objeto de evaluar el comportamiento de una sección experimental de firme.
- También se han colocado sensores para medir las deflexiones del pavimento, la deformación longitudinal y la temperatura de las capas de la mezcla bituminosa, la humedad de la explanada y una serie de variables ambientales necesarias para realizar el análisis.
- Además de estos sensores se ha instalado un sistema WIM a la entrada del tramo de ensayo. El objetivo es correlacionar los pesos de los camiones y de sus ejes con las deflexiones y las tensiones del pavimento.

