

PROYECTO **REPARA**^{2.0}

*Desarrollo de nuevas técnicas y sistemas de información para la
REhabilitación sostenible de PAvimentos y carreteRAS*

Paquete de Trabajo 3

Auditoría Hito 1

Índice

Entregables realizados por el CEDEX

Definición, ventajas e inconvenientes del pesaje dinámico

Tipos de sistemas de pesaje dinámico

Condiciones que debe cumplir la carretera en el emplazamiento


Instalación en la carretera del sistema de pesaje dinámico

Calibración del sistema de pesaje dinámico instalado

Evaluación de la precisión del sistema de pesaje dinámico instalado

Seguimiento del funcionamiento del sistema

Conclusiones

- Entregable D 3.11 Informe sobre el estado del arte del Pesaje Dinámico (junio 2016) **(Hito 1)**
 - Entregable D 3.12 Informe sobre recomendaciones para la instalación de una estación de medición de pesos de vehículos en movimiento (noviembre 2016) **(Hito 1)**
 - Entregable D 3.13 Informe de instalación del sistema de pesaje dinámico en la carretera (junio 2018) **(Hito 2)**
 - Entregable D 3.14 Informe de calibración del sistema de pesaje dinámico instalado en el tramo (diciembre 2019) **(Hito 3)**
 - Entregable D 3.15 Informe de verificación de la precisión inicial, su permanencia en el tiempo seguimiento del funcionamiento del equipo (abril 2020) **(Hito 3)**
- 



PESAJE DINÁMICO: DEFINICIÓN, VENTAJAS Y DESVENTAJAS (Hito1)



El **Pesaje dinámico** o **pesaje de vehículos en movimiento** (internacionalmente conocido por sus siglas en inglés: **WIM – Weigh-in-Motion-**) abarca una serie de técnicas dirigidas a medir las masas de los vehículos y sus ejes sin interferir en el tráfico de una carretera

Ventajas del pesaje dinámico (frente al pesaje estático de vehículos):

- Permite medir el peso de todos los vehículos que circulan por un carril, calzada o carretera, frente a unas pocas decenas de vehículos que pueden pesarse estáticamente por día
- Los sistemas de pesaje dinámico pueden funcionar de forma continua 24 horas al día todos los días del año sin necesidad de personal, frente a unas horas al día, dependiendo del horario de trabajo de los operarios, de las básculas de pesaje estático
- Los sistemas de pesaje dinámico no son detectados por los vehículos, por lo que los datos que se obtienen con ellos no están segados por la evasión de los camiones sobrecargados.

Desventajas del pesaje dinámico

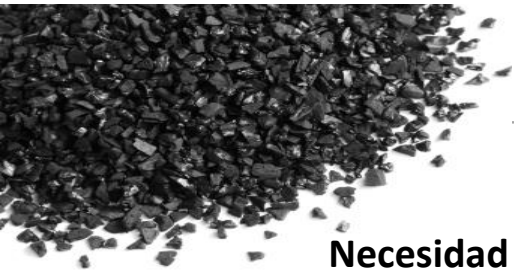
- Su precisión en la medida de los pesos no puede expresarse de forma absoluta, sino estadísticamente, por lo que hace difícil su utilización para el control legal de los pesos de los vehículos y sus ejes.
- La precisión de los pesajes dinámicos se ve afectada en gran medida por la regularidad superficial del pavimento.

Tipos de sistemas de pesaje dinámico

- Puentes báscula con células de carga
- Placas en flexión
- Esteras capacitivas
- Sistemas **piezoeléctricos**:
 - piezocerámicos
 - **piezopolímeros** → sistema instalado en la A-1 en el Molar
 - cristal de cuarzo
- Fibra óptica
- Puentes de pesaje en movimiento (Bridge WIM)

Normativa internacional sobre el pesaje dinámico

- Especificaciones Europeas del Pesaje en Movimiento (elaboradas por el comité COST 323)
- Norma ASTM E 1318



CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR EL FIRME EN EL LUGAR DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE DINÁMICO (Hito 1)

Necesidad de que la carretera y el firme cumplan unas condiciones mínimas

- Las condiciones generales de la vía y del pavimento afectan tanto a la precisión de los pesajes como a la durabilidad de un sistema de pesaje dinámico instalado en ella, debido a las **cargas dinámicas ejercidas por las ruedas de los vehículos** al circular a velocidad normal sobre un pavimento de una carretera. →
- Es esencial que tanto la carretera como el firme cumpla unos requisitos mínimos para limitar estas cargas dinámicas de los vehículos con el fin de asegurar tanto un correcto funcionamiento como una buena precisión de los sistemas de pesaje dinámico.

Condiciones que debe cumplir la carretera y el pavimento en el lugar de instalación

- Características geométricas de la vía: **tramo recto** (radio de curvatura > 1.000 m), **llano** (pendiente longitudinal < 2% y de valor constante), **sin peralte** (pendiente transversal < 3%) y **alejado de cualquier tramo de aceleración o deceleración** (entrada o salida de la autopista o carretera, semáforo, intersección)

Características del firme:

- no deben existir grietas, baches, juntas, etc.
- Regularidad superficial adecuada: **valores del IRI** (índice de regularidad internacional) entre 0 y 1,3 m/km para un emplazamiento excelente, entre 1,3 y 2,6 m/m km (emplazamiento bueno) y entre 2,6 y 4 m/km (aceptable)
- Capacidad portante (resistente) mínima: **deflexión dinámica** para una carga de 50 kN menor de $20 \cdot 10^{-2}$ mm en firmes semirrígidos y de $35 \cdot 10^{-2}$ mm en firmes bituminosos.

COMPROBACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA Y DEL PAVIMENTO EN EL SITIO ELEGIDO (Hito 2)

Pre-Instalación del equipo de pesaje dinámico

- Características geométricas: tramo recto y llano
- Comprobación de la idoneidad del pavimento en el sitio elegido (ausencia de deterioros, regularidad superficial y capacidad portante)
 - Ausencia de fisuras → Inspección visual
 - Regularidad transversal: ausencia de hendiduras y roderas → Regla de 3m
 - Regularidad longitudinal: medición del IRI: → Perfilómetro láser
 - Capacidad portante: medición de deflexión bajo carga → Deflectómetro de impacto



Tramo de instalación recto y llano



Deflectómetro de impacto

INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE EN LA A-1 pk. 41,6 (EL MOLAR) (Hito 2)

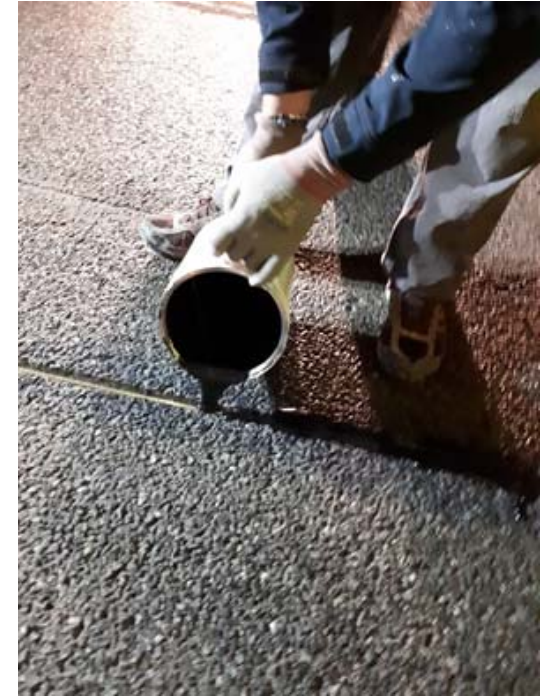
La instalación del sistema de pesaje dinámico en la carretera fue realizada en mayo de 2018



Ejecución del corte en el pavimento
Para realizar la ranura donde se
aloja el sensor de peso



Colocación del sensor
piezopolímero en la ranura



Sellado del sensor utilizando
resina epoxi con acelerante

Hito 3



Vista de los sensores del sistema de pesaje con la calzada abierta al tráfico el día de la calibración

Definición de la calibración de un sistema de pesaje dinámico: es la operación de ajustar los valores proporcionados por el sistema de pesaje dinámico a los niveles de referencia (los pesos reales (estáticos) de los vehículos).

- Debe realizarse siempre una calibración después de la instalación inicial del sistema o tras alguna reparación importante del mismo.
- También debe realizarse periódicamente una calibración del sistema después de un periodo determinado de funcionamiento (cada 6 meses o 1 año) , que depende de la tecnología de los sensores y de la influencia de las condiciones ambientales en su funcionamiento.

Tipos de calibración:

- Estática: mediante la aplicación sobre el sensor de una carga estática mediante un gato o a través de la colocación de masas de calibración de varias intensidades sobre el sensor para que el valor de la respuesta emitida por el sistema coincida con el valor de la carga o las masas. Inconveniente: no se puede utilizar para calibrar sensores **piezoeléctricos**
- Dinámica: consiste en utilizar camiones de calibración de peso conocido, que circulan repetidas veces sobre el sistema de pesaje dinámico, para ajustar el factor de calibración de forma que la respuesta media emitida por el sistema sea igual al peso estático del vehículo.

CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE DINÁMICO INSTALADO (Hito 3)

Se realizó una calibración de tipo dinámico realizando varias pasadas con un camión articulado de 5 ejes, cargado con pesas y una carretilla (véase la foto), cuyo peso era conocido (véase la tabla de debajo).



| | Peso estático (kg) | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------|-------|-------|-------|-------------------|
| Camión de calibración | Eje 1 | Eje 2 | Eje 3 | Eje 4 | Eje 5 | Vehículo completo |
| | 7.780 | 11.440 | 7.195 | 7.185 | 7.035 | 40.635 |

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL SISTEMA (Hito 3)

- Se realizaron varias series de pasadas con el camión de calibración a 80 - 90 km/h
- Se visualizaban en tiempo real los pesos registrados por el sistema en cada pasada, identificándose los registros del camión de calibración
- Se calculaba el valor promedio del peso del vehículo dado por el sistema
- Comparando el valor promedio del peso del camión dado por el sistema con el peso real de éste, se obtenía el factor de calibración



Se necesitaron 4 series de pasadas del camión de calibración para obtener un factor de calibración suficientemente ajustado y estable.

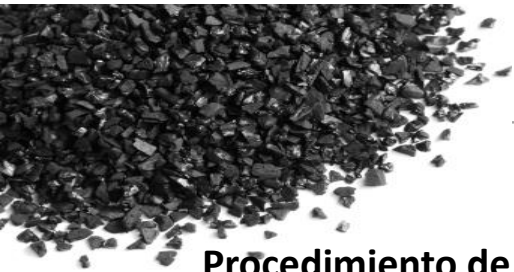
Vista del camión de calibración en el momento justo de pasar sobre el sistema de pesaje



DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CALIBRACIÓN (Hito 3)

Se lleva a cabo un proceso iterativo, realizando varias series de pasadas del vehículo de calibración, introduciendo en el sistema tras cada serie de pasadas un factor de calibración que corrija el sesgo (error relativo medio) del sistema, hasta conseguir que éste sea casi nulo.

| Serie de pasadas de calibración | Peso bruto medio del vehículo dado por el sistema (Pm dinámico) (kg) | Peso real (estático) del vehículo (Pest) (kg) | Error relativo medio o sesgo del sistema (%) $E (\%) = 100 * (\text{Peso medio dinámico} - P_{\text{est}}) / P_{\text{est}}$ |
|---------------------------------|--|---|---|
| 1 | 28.064 | 40.650 | - 30, 96 |
| 2 | 42.447 | | 4,42 |
| 3 | 42.943 | | 5,64 |
| 4 | 40.623 | | - 0,07 |



EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE DINÁMICO INSTALADO (Hito 3)



Procedimiento de evaluación

- La evaluación de la precisión del sistema de pesaje dinámico instalado en El Molar se ha realizado utilizando los datos de las pasadas del vehículo utilizado para la calibración, pues para ello, se requiere conocer como referencia los pesos reales (estáticos) de algún vehículo.

- Las **variables fundamentales** sobre las que se evalúa la precisión de un sistema de pesaje dinámico son:
 1. El **sesgo medio** en la medida de los pesos de los vehículos, calculado como el error relativo medio de las medidas de pesos tomadas.
 - Este sesgo medio debería ser lo más próximo a cero que sea posible y, de tener un valor alto, se puede corregir mediante una calibración adecuada del equipo

 2. La **dispersión de las medidas**, que puede expresarse en función de la desviación típica de éstas o como el porcentaje de medidas que están dentro de un cierto intervalo de confianza.
 - La dispersión de las medidas es una magnitud intrínseca de la precisión del sistema de pesaje (para unas condiciones dadas del pavimento), no se puede corregir y proporciona una idea de la precisión real del sistema de peaje (cuanto menor sea la dispersión, mayor es la precisión del sistema)

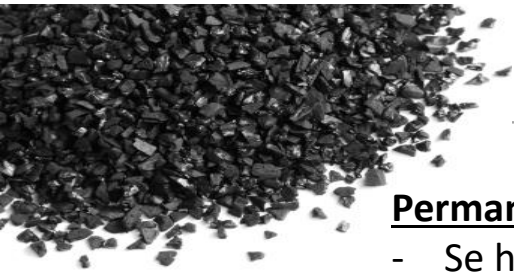
-



EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE: RESULTADOS OBTENIDOS (Hito 3)

- Se puede observar que, al contrario que ocurre con el error relativo medio (sesgo), la **desviación típica de los pesos dinámicos permanece casi inalterable en torno al 5%**, pues es una característica intrínseca del equipo para unas condiciones del pavimento dadas
- Asumiendo una distribución normal de los errores del sistema, la precisión teórica del sistema para un 95% de las medidas (que es la forma usual de expresarla en las normas) sería aproximadamente de un $\pm 10\%$.
 - No obstante, como la evaluación se realizó con diferentes pasadas de un único vehículo (el camión de calibración), los valores reales de la dispersión para una muestra de vehículos representativa del tráfico sería algo superior, y cabe cifrarla en un $\pm 15\%$ para el 95% de las medidas (**Clase C (15) de la Norma**).

| Serie de pasadas del camión de calibración | Peso medio dinámico del camión registrado por el sistema (kg) | Sesgo = Error relativo medio (con respecto al peso estático del camión) (%) | Dispersión = Desviación típica de los pesos dinámicos (%) |
|--|---|---|---|
| 1 | 28.064 | - 30, 96 | 4,87 |
| 2 | 42.447 | 4,42 | 5,22 |
| 3 | 42.943 | 5,64 | 4,46 |
| 4 | 40.623 | - 0,07 | 4,80 |



PROBLEMAS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PESAJE DINÁMICO INSTALADO (Hito 3)



Permanencia en el tiempo de la calibración del sistema

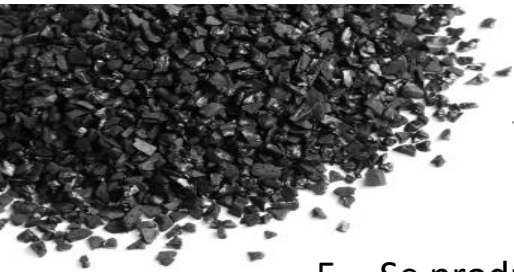
- Se ha comprobado de forma indirecta (es decir, sin realizar nuevas pesadas con camiones calibrados), a través de evaluar la variación de ciertas características que suelen permanecer inalterables en el tráfico de vehículos pesados, como puede ser el peso medio de alguna clase particular de camión o de alguno de sus ejes.
- Se ha visto que los pesos evaluados parecen descender (o ascender) entre un 2% y un 3% según bajan (o suben) las temperaturas medias, lo que podría deberse a que no está bien ajustada la corrección de los pesos según las temperaturas, que lleva a cabo el propio sistema.

Seguimiento del funcionamiento del sistema: problemas encontrados

- El sistema funcionó de forma ininterrumpida desde su primera instalación en mayo de 2018 hasta la primavera de 2019, comprobándose en junio de ese año un funcionamiento incorrecto de uno de los sensores, que sólo podía deberse a que estaba roto.
- Esta rotura temprana pudo deberse a la lluvia que cayó la noche de la instalación (debe realizarse en seco). Se sustituyó el sensor en septiembre de 2019.
- Se ha visto que durante algunos días del mes de diciembre, cuando hay pocas horas de insolación, circunstancia agravada por las malas condiciones meteorológicas, se interrumpe el funcionamiento del sistema, lo que se debe a que en esas condiciones el panel solar no puede suministrar suficiente energía. No obstante, una vez que vuelve la luminosidad, el sistema vuelve automáticamente a funcionar correctamente

CONCLUSIONES (I)

1. Los sistemas de pesaje dinámico de vehículos permiten conocer el peso de todos los vehículos que circulan por una carreteras, de forma continua y durante largos periodos de tiempo, por lo que **constituyen un medio adecuado de obtener datos estadísticos** de los vehículos que constituyen el tráfico pesado de una carretera, **para su aplicación en el proyecto y conservación de firmes viarios**.
2. Los sistemas de **tipo piezoeléctrico** tienen la ventaja de que su afección al firme es pequeña y, entre ellos, los de tipo piezopolímero, de que su coste es reducido, con un nivel de precisión aceptable, por lo que se escogió un sistema de este tipo (sensores ROADTRAX BL, equipo electrónico HI TRAC).
3. Mediante una calibración de tipo dinámico (realizando varias pasadas de un camión de peso conocido sobre el sistema) se ha reducido el elevado sesgo inicial del equipo tras su instalación.
4. La precisión del equipo se ha determinado evaluando la dispersión de las medidas individuales proporcionadas por el sistema en cada pasada del camión de calibración. La **desviación típica** de estas medidas, propiedad intrínseca del sistema para unas condiciones dadas del pavimento, se ha mantenido en todas las series de pasadas en **valores próximos al 5%**, por lo que podría decirse que el 95% de las medidas se mantienen dentro de un valor del error del $\pm 10\%$. No obstante, este valor aumenta hasta el 7,5% cuando se producen algunas variaciones laterales en las pasadas, por lo que se puede decir que **el sistema estaría en la clase de precisión C(15)** según las Especificaciones Europeas WIM del Comité COST 323.



CONCLUSIONES (II)

5. Se produjo la rotura de uno de los sensores de peso del sistema, que tuvo que ser reemplazado. Esta **rotura** pudo deberse a una **instalación defectuosa del mismo**, pues cayó una fuerte tormenta en el momento en que se estaban instalando los sensores. Esto indica además la necesidad de que la instalación de los sensores se realice de forma muy cuidadosa para conseguir una adecuada durabilidad de estos.
6. Se ha evaluado la **permanencia en el tiempo de la calibración**, observándose que **pueden producirse desviaciones de entre un 2% y un 3% mensual**. La alta magnitud de esta variación, obligaría a realizar una calibración cada mes, si se desea mantener los errores en unos niveles tolerables, lo que podría constituir el mayor inconveniente para la utilización de este tipo de sistemas de piezopolímeros para obtener datos estadísticos del tráfico pesado.