

www.piarc.org  
2019R14ES

# ESTADO DEL ARTE DE LA AUSCULTACIÓN DEL ESTADO DE LA CARRETERA Y DE LA INTERACCIÓN VEHÍCULO/CARRETERA

COMITÉ TÉCNICO D.2 *FIRMES DE CARRETERA*



# **SOBRE LA ASOCIACIÓN MUNDIAL DE LA CARRETERA**

*La Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR) es una organización sin fines de lucro establecida en 1909 para mejorar la cooperación internacional y fomentar el progreso en el ámbito de las carreteras y el transporte por carretera.*

*El estudio objeto del presente informe se definió en el Plan Estratégico de la AIPCR de 2016-2019 aprobado por el Consejo de la Asociación Mundial de la Carretera, integrado por representantes de los gobiernos nacionales miembros. Los miembros del Comité Técnico responsable de este informe fueron nominados por los gobiernos nacionales miembros debido a sus competencias especiales.*

*Las opiniones, resultados, conclusiones y recomendaciones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de sus entidades o agencias matrices.*

*Este informe está disponible en la página web de la Asociación Mundial de la Carretera: <http://www.piarc.org>*

*Copyright World Road Association. Reservados todos los derechos.*

*Asociación Mundial de la Carretera (PIARC)*

*Arche Sud 5° niveau*

*92055 La Défense Cedex, France*

*ISBN: 978-2-84060-531-7*

*Portada © Equipo de auscultación multifuncional con TSD, GPR, PPS, texturómetro laser,... © BASt*

**ESTADO DEL ARTE  
DE LA AUSCULTACIÓN  
DEL ESTADO DE LA CARRETERA  
Y DE LA INTERACCIÓN  
VEHÍCULO/CARRETERA**

**COMITÉ TÉCNICO D.2 *FIRMES DE CARRETERAS***

## AUTORES Y AGRADECIMIENTOS

Este informe ha sido preparado por el grupo de trabajo D.2.3 del Comité Técnico D.2 Firmes de la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC).

En la preparación de este informe han participado:

- Joralf AURSTAD (Noruega)
- Anneleen BERGIERS (Bélgica)
- Margo BRIESSINCK (Bélgica)
- Piotr DABROWSKI (Polonia)
- Slawomir EJSMONT (Polonia)
- Michal JANKU (República Checa)
- Martyn JONES (Reino Unido)
- Keizo KAMIYA (Japón)
- Serge KRAFFT (Francia)
- Mehis LEIGRI (Estonia)
- Helena LIMA (Portugal)
- Johan MAECK (Bélgica)
- Michael MOFFATT (Australia)
- Barry NOTHARD (Reino Unido)
- Florica PADURE (Rumania)
- Leif SJOGREN (Suecia)
- Roland SPIELHOFER (Austria)
- Josef STRYK (República Checa)
- Julio VAQUERO (España)

Margo BRIESSINCK (Bélgica) ha sido el redactor en lengua inglesa de este informe.

La traducción de la versión original al francés ha sido realizada por Serge KRAFFT (Francia) y la traducción al español por Julio VAQUERO (España).

Carl VAN GEEM (Bélgica) y Richard WIX (Australia) han sido los responsables del control de calidad de la elaboración de este informe.

El Comité Técnico ha sido presidido por HAN Seung-Hwan (Corea del Sur). Serge KRAFFT (Francia), Johan MAECK (Bélgica) y Diego CALO (Argentina) actuaron, respectivamente, como secretarios de habla francesa, inglesa y española.

2019R14ES

## **ESTADO DEL ARTE DE LA AUSCULTACIÓN DEL ESTADO DE LA CARRETERA Y DE LA INTERACCIÓN VEHÍCULO/CARRETERA**

Este informe es continuación del informe “Estado del arte de la auscultación del estado de la carretera” finalizado en 2015 (referencia PIARC 2016R17EN). El informe de 2015 resumía el estado actual de la técnica en relación a la toma de datos del estado de la carretera y la interacción vehículo/carretera, proporcionando una visión general de las prácticas actuales y las tecnologías emergentes. Este informe es una actualización de algunos capítulos como consecuencia de nuevos desarrollos obtenidos en investigaciones recientes, y en él se analizan también algunas tecnologías en fase de desarrollo y experimentación.

El documento pretende informar al lector de forma concisa sobre las diferentes tecnologías disponibles, sin profundizar en los múltiples detalles de cada una de ellas, que pueden consultarse en otras fuentes.

Se analiza cada uno de los parámetros del estado de la carretera y de la interacción vehículo/carretera, proporcionando una definición de cada uno de ellos, la descripción de los métodos de medición y los indicadores de estado/interacción derivados de los datos medidos.

# ÍNDICE

<b>0. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>1. REGULARIDAD SUPERFICIAL</b> .....	<b>7</b>
1.1. ESCANER DE PERFILES DEL PAVIMENTO (PPS).....	7
1.2. REGULARIDAD DE LOS CARRILES PARA BICICLETAS.....	9
<b>2. CARACTERISTICAS DE LA INTERACCION VEHICULO/CARRETERA</b> .....	<b>13</b>
2.1. ROZAMIENTO.....	13
2.2. RESISTENCIA A LA RODADURA .....	20
2.3. PROYECCION Y PULVERIZACION DE AGUA .....	23
<b>3. DEFECTOS SUPERFICIALES</b> .....	<b>27</b>
3.1. TECNOLOGÍA DE CAPTURA DE IMÁGENES.....	27
3.2. CAMARAS DE INFRARROJOS .....	30
<b>4. ESTADO ESTRUCTURAL</b> .....	<b>34</b>
4.1. DEFLECTOMETRO A VELOCIDAD DE TRAFICO TSD .....	34
4.2. GEORADAR .....	37
4.3. DEFLECTOMETRO LIGERO.....	42
<b>5. TECNOLOGÍAS EMBARCADAS</b> .....	<b>46</b>
5.1. INTRODUCCION .....	46
5.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	49
5.3. COMPARACION CON TECNOLOGIAS DEDICADAS ESPECIFICAS .....	51
5.4. DISCUSION .....	53
5.5. BIBLIOGRAFIA .....	54

<b>6. CASOS PRÁCTICOS .....</b>	<b>55</b>
6.1. UTILIZACION DEL DEFLECTOMETRO LIGERO A NIVEL MUNDIAL.....	55
6.2. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD) PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS DE PAVIMENTACION EN PORTUGAL.....	59
6.3. DESARROLLO DE UN DEFLECTOMETRO DINAMICO DE PEQUEÑO TAMAÑO EN JAPON.....	64
6.4. INSPECCION DE DETERIOROS SUPERFICIALES A PARTIR DE IMAGENES DE 360º EN ESTONIA .....	70
6.5. EQUIPO DE REFERENCIA PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE MEDIDAS DE REGULARIDAD .....	76
<b>7. GLOSSARIO.....</b>	<b>80</b>

## 0. INTRODUCCIÓN

Los firmes de carretera son un componente importante de la infraestructura pública que se proyectan para tener una larga vida de servicio proporcionando, en todas las condiciones climáticas, un acceso cómodo y seguro para los bienes y las personas.

La evaluación del estado de los firmes tras su construcción permite comparar las características de la estructura construida con los objetivos perseguidos en el proyecto. A lo largo de su vida útil esta evaluación suelen realizarla los propietarios de la carretera para comprobar que los firmes siguen proporcionando unas condiciones de circulación eficiente y segura para las que fueron proyectados. Si la auscultación de su estado indica que el comportamiento del firme está comprometido, la información recopilada puede utilizarse para identificar la causa del problema, ayudar en el diseño de los tratamientos y priorizar las posibles actuaciones de la manera más eficiente posible, dentro de las limitaciones operativas y presupuestarias. Al aproximarse el final de la vida útil del firme, los parámetros de estado recopilados pueden emplearse como entrada para la elección y el proyecto de las actuaciones de rehabilitación o reconstrucción de este.

Los Capítulos 1 a 4 describen cada uno de los parámetros medidos del estado de la carretera y de la interacción vehículo/carretera. Se da una definición para cada parámetro, así como una descripción de los métodos de medición utilizados (con referencia a equipos especializados, cuando proceda) y una descripción de los indicadores de estado/interacción derivados de los datos medidos.

Una de las tecnologías emergentes descritas en este informe es el empleo de sistemas “embarcados”, como sensores en automóviles o teléfonos móviles. En el Capítulo 5 se analizan algunas de sus posibles aplicaciones.

El Capítulo 6 recoge algunos casos prácticos que describen el uso de los métodos de auscultación descritos en los capítulos precedentes en diversas partes del mundo.

Este informe es una actualización y ampliación del informe de PIARC sobre auscultación de carreteras publicado en 2015 (denominado en este informe como “el informe de 2015”). La siguiente tabla proporciona una visión general de todos los parámetros de estado de la carretera y de la interacción vehículo/carretera descritos en los informes de 2015 y/o 2019 indicando los capítulos correspondientes.



TABLA 0 – VISIÓN GENERAL		
PARÁMETRO / TÉCNICA	INFORME 2015	INFORME 2019
<b>Regularidad superficial</b>		
Regularidad transversal	2.2	
Regularidad longitudinal	2.3 caso 2 caso 3	caso 6.5
Escáner de Perfiles del Pavimento (PPS)		1.1
Regularidad de carriles para bicicletas		1.2
<b>Características de la interacción vehículo/carretera</b>		
Textura superficial	3.2	
Rozamiento	3.3	2.1
Ruido del tráfico	3.4	
Resistencia a la rodadura	3.5	2.2
Proyección de agua y salpicaduras		2.3
<b>Deterioros superficiales</b>		
Fisuración	4.1.2	
Baches / desniveles locales / depresiones	4.1.3	
Delaminación	4.1.4	
Pérdida de gravilla	4.1.5	
Rotura de borde	4.1.6	
Exudación	4.1.7	
Desconchado	4.1.8	
Parqueo	4.1.9	
Pulimento	4.1.10	
Sistemas de medición láser 3D (LCMS)	4.1.2	
Escáneres lineales 2D	4.1.2	
Tecnología de toma de imágenes		3.1 caso 6.4
Cámaras de infrarrojos		3.2
<b>Estado estructural</b>		
Viga Benkelman	5.1.1	
Deflectógrafo	5.1.1	
Curviámetro	5.1.1	
Deflectómetro de impacto (FWD)	5.1.1	caso 6.2
Deflectómetro rodante (FHWA)	5.1.1	
Deflectómetro a velocidad de tráfico (TSD)	5.1.1	4.1 caso 6.3
Georadar		4.2

Deflectómetro ligero LFWD		4.3 caso 6.1
Tecnologías embarcadas	caso 4	5
Misceláneo		
Importancia de la gestión de la calidad de los datos	6	
Gestión de calidad: verificación y validación	7	
Control de calidad de los datos de las características superficiales de la carretera	caso 1	
Equipos de referencia para el aseguramiento de la calidad de las mediciones de regularidad superficial		caso 6.5

## 1. REGULARIDAD SUPERFICIAL

### 1.1. ESCÁNER DE PERFILES DEL PAVIMENTO (PPS)

#### 1.1.3. Definición

El Escáner de Perfiles de Pavimento (PPS) 3D LiDAR (Light Detection And Ranging) es un dispositivo de alta precisión para la evaluación del estado de la superficie de la carretera (regularidad longitudinal y transversal) independiente de la velocidad de medición.

#### 1.1.4. Método de medición

El escáner PPS ha sido específicamente desarrollado para la evaluación del estado de las carreteras y es completamente independiente de las limitaciones relativas a la velocidad del equipo sobre el que se instale, ofreciendo al mismo tiempo la máxima precisión de medición a nivel submilimétrico. El escáner utiliza el principio de funcionamiento LiDAR y mide la distancia, el ángulo y la intensidad desde el dispositivo hasta la superficie del pavimento a alta velocidad y precisión utilizando un láser. El escaneado obtenido representa un modelo tridimensional de la superficie de la carretera. El escáner láser mide con precisión y rapidez, lo que lo convierte en una solución económica para la medición de defectos y el modelado de la superficie para mejorar la seguridad y la vida útil del firme.



Figura 1.1-1 - Escáner de pavimento

#### 1.1.4.1. Características

- perfiles de la superficie en 3D
- velocidad de trabajo entre 0 y 80 km/h
- funcionamiento con tráfico real, sin cierre de carril
- perfil transversal de 4 m de anchura (dependiendo de la altura de montaje)
- 900 puntos por perfil
- sistema láser clase 1 - no es necesario apagarlo en zonas urbanas o cuando la velocidad disminuye
- velocidad de adquisición de datos 2 MHz – (2 millones de muestras por segundo)
- láser dispersado con un espejo poligonal que gira a 800 Hz. A una velocidad de medición de 80 km/h se consigue una distancia entre líneas de exploración de 27 mm
- precisión entre 0,1 y 0,3 mm
- carcasa sellada y resistente a la intemperie

### 1.1.5. Indicadores

- perfiles longitudinales en cualquier posición y todos los indicadores de regularidad derivados de los perfiles longitudinales (IRI, PSD, WLP y AUN)
- perfiles transversales y todos los indicadores de regularidad transversal derivados de ellos (la profundidad de rodera, altura teórica de película de agua y textura)
- nube de puntos 3D georeferenciada con valores de intensidad
- Ortofoto georeferenciada de la superficie de la carretera
- Generación de modelos de carretera OpenCRG 3D para simulaciones de automóviles (véase <http://www.opencrg.org>)

#### 1.1.5.1. Ejemplo de salida de datos



Figura 1.1-2 - Nube de puntos 3d coloreada por intensidad

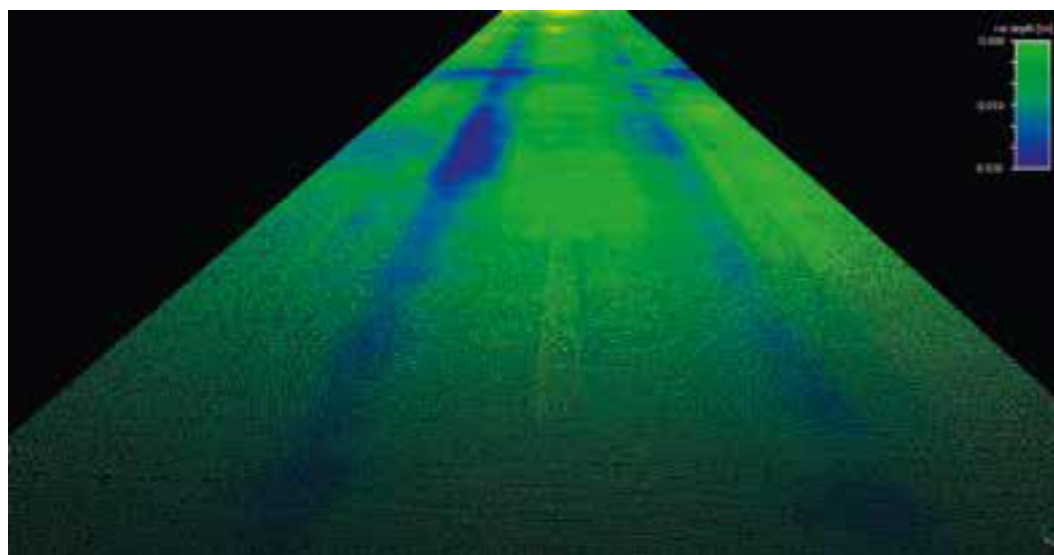


Figura 1.1-3 - Nube de puntos 3d coloreada por altura

## 1.2. REGULARIDAD DE LOS CARRILES PARA BICICLETAS

### 1.2.3. Definición

La regularidad longitudinal de los carriles para bicicletas es similar a la de otras superficies pavimentadas; se trata, por tanto, de obtener una medida de las variaciones del perfil longitudinal.

### 1.2.4. Método de medición

El perfil longitudinal se mide con un perfilómetro constituido por un láser y un acelerómetro. La velocidad de medición debe ser de, al menos, 15 km/h, pero lo ideal es que esté comprendida entre 20 y 40 km/h.



Figura 1.2-1 - Perfilómetro para carriles bici montado en un remolque [Fuente: Agencia de carreteras y tráfico, región de Bélgica/Flandres]

En Bélgica, la regularidad de un pavimento se evalúa mediante el llamado coeficiente de regularidad (EC) para una determinada longitud de onda  $\lambda$ . Un EC teórico de 0 corresponde a una superficie perfectamente lisa. Cuanto más alto sea el CE, más rugosa será la superficie. Este método fue desarrollado por el Centro de Investigación de Carreteras Belga (BRRC) en 1981, inicialmente para evaluar la regularidad longitudinal de los firmes de carretera.

La longitud de onda fundamental depende de las longitudes de onda perceptibles por el usuario y, por lo tanto, de la velocidad del vehículo. Para los carriles bici se utilizan las siguientes longitudes de onda:

- $\lambda = 0,5$  m, proporciona un coeficiente de regularidad  $EC_{0,5}$ . Una longitud de onda de 0,5 m se considera tradicionalmente como el límite entre la regularidad y el rango de megatextura y es un buen indicador de la calidad de conducción experimentada por el ciclista;
- $\lambda = 2,5$  m, proporciona un coeficiente de regularidad  $EC_{2,5}$ , que corresponde a la longitud de onda más baja que se utiliza en Bélgica para los firmes de carreteras.

El CE se calcula para tramos de 25 m de longitud. En Bélgica se ha establecido que los coeficientes de irregularidad máximos admisibles para los carriles para bicicletas de nueva construcción sean:

- $EC_{0,5} \leq EC_{0,5_{\max}} = 15 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{hm}$
- $EC_{2,5} \leq EC_{2,5_{\max}} = 45 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{hm}$



Figura 1.2-2 – Medidor de confort para bicicletas [fuente: KIWA, Países Bajos]

En los Países Bajos, la regularidad se mide con dos perfilómetros (ver **Figura 1.2-2**), con una distancia de 80 cm entre ellos, que más o menos se corresponde con la distancia entre dos ciclistas. Cada perfilómetro mide el perfil longitudinal.

El perfil longitudinal es la entrada para simular sobre él un modelo teórico de bicicleta (ver **Figura 1.2-3**). En el modelo una bicicleta se desplaza a una velocidad de 15 km/h sobre el perfil medido y se calcula la aceleración vertical  $C_v$  al nivel del sillín (punto G) para una longitud de 100 m. La **Tabla 1.2-1** indica los valores límite para las diferentes clases de confort.

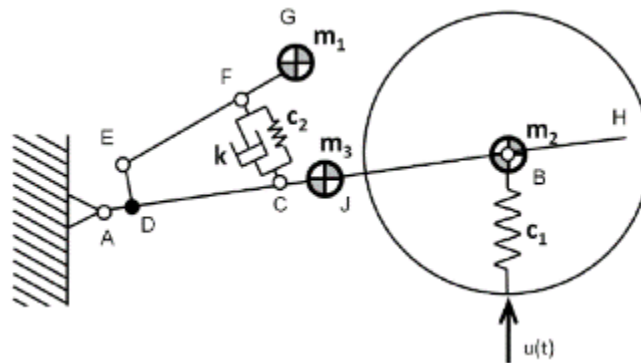


Figura 1.2-3 – Modelo de bicicleta [fuente: KIWA, Países Bajos]

TABLA 1.2-1 – CLASES DE CONFORT	
$C_v < 1,1$	excelente
$C_v = 1,1$	bueno
$C_v = 1,7$	razonable
$C_v = 2,1$	medio
$C_v = 2,5$	nivel mínimo aceptable

### 1.2.5. Indicadores

El coeficiente de regularidad (EC) belga es un parámetro técnico que puede transformarse en un índice de comportamiento adimensional en una escala de 0 a 5, siendo 0 una situación muy buena y 5 una muy mala, mediante la aplicación de una función de transferencia. [1]

Para evaluar la regularidad de los carriles bici, el uso de una función de transferencia logística o en forma de S proporciona una buena evaluación de la calidad de la conducción tal y como la experimenta el ciclista.

Una función logística es una curva en forma de S (sigmoidea) del tipo  $f(x) = M / (1 + e^{-k \cdot (x - x_0)})$  donde:

- M = es el valor máximo de la curva (en este caso M = 5)
- $x_0$  = el valor de x del punto medio del sigmoide
- k = la pendiente de la curva

El punto medio del sigmoide se define como el doble del CE admisible para pavimentos nuevos, por ejemplo 30 ( $\times 10^3 \text{ mm}^2/\text{hm}$ ) para EC0,5 y 90 ( $\times 10^3 \text{ mm}^2/\text{hm}$ ) para EC2,5. Esto corresponde a un índice de regularidad (EI) de 2,5. La pendiente de la curva se define de manera que  $EI = 1$  si  $EC = EC_{\lambda_{\max}}$ . Se puede deducir que en este caso  $k = \ln 4 / EC_{\lambda_{\max}}$ .

Por lo tanto, la función de transferencia es  $EI = 5 / (1 + e^{-k \cdot (EC - 2 \times EC_{\lambda_{\max}})})$  (ver **Figura 1.2-4**).

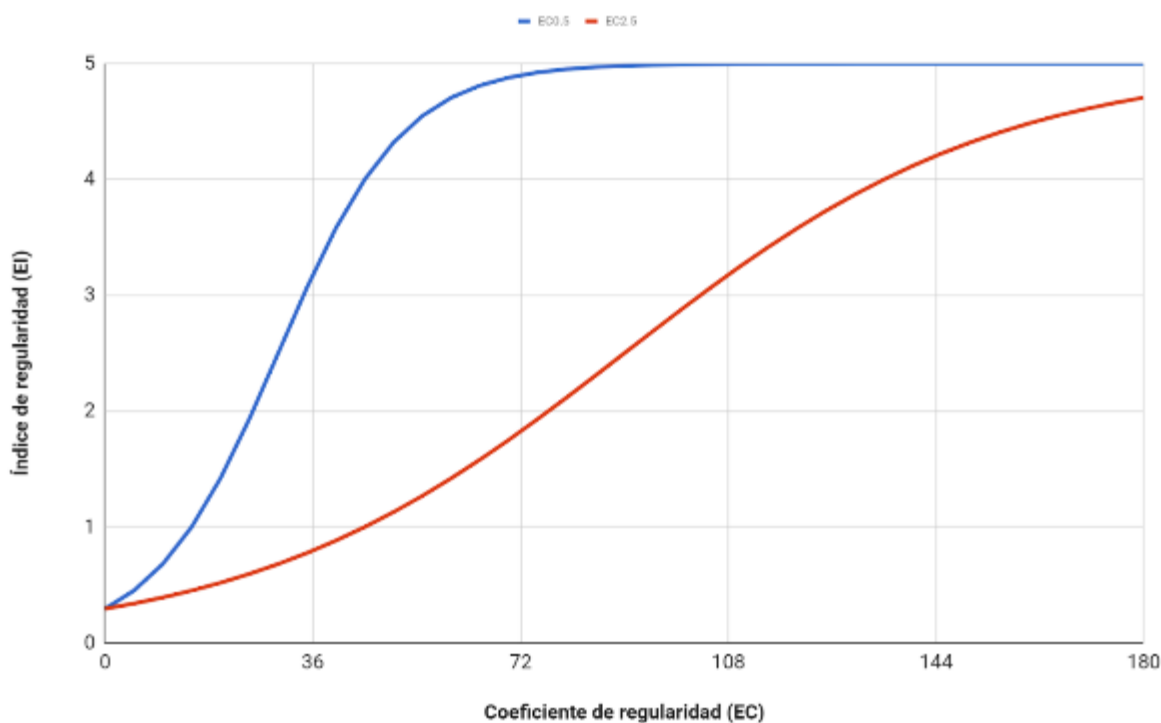


Figura 1.2-4 – Función de transferencia para EC0,5 y EC2,5

El índice de regularidad puede usarse para definir la calidad del pavimento, tal y como se indica en la **Tabla 1.2-2**.

<b>TABLA 1.2-2 – NIVELES DE CALIDAD</b>			
<b>EI</b>	<b>CALIDAD</b>	<b>EC0,5</b>	<b>EC2,5</b>
0 – 1	muy buena	0,0 – 15,0	0,0 – 45,0
1 – 2	buena	15,0 – 25,6	45,0 – 76,8
2 – 3	media	25,6 – 34,4	76,8 – 103,2
3 – 4	deficiente	34,4 – 45,0	103,2 – 135,0
4 – 5	muy deficiente	45,0 – ∞	135,0 – ∞

#### 1.2.6. Bibliografía

- [1] The way forward for pavement performance indicators across Europe, COST Action 354 on “Performance Indicators for Road Pavements”, Informe final, julio 2008.



## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA INTERACCIÓN VEHÍCULO/CARRETERA

### 2.1. ROZAMIENTO

#### 2.1.3. Definición

El rozamiento se define como la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. En la práctica de medición, el término "resistencia al deslizamiento" se utiliza y define como el nivel de rozamiento entre un neumático de ensayo y la superficie del pavimento cuando se mide de acuerdo con un método normalizado. La resistencia al deslizamiento depende de una serie de factores tales como:

- las características de la superficie del pavimento (microtextura, macrotextura, megatextura, edad y propiedades del material);
- los parámetros de funcionamiento del vehículo (velocidad, relación de deslizamiento, acción de frenado y acción de conducción);
- las propiedades del neumático (diseño y desgaste de la banda de rodadura, composición y dureza del caucho, dimensiones, presión de inflado y carga vertical);
- las condiciones ambientales (altura de la película de agua, estación, temperatura y contaminantes superficiales).

#### 2.1.4. Métodos de medición

Se han desarrollado diversos métodos de medición para cuantificar el rozamiento, que se dividen en tres categorías principales:

- método de medición del rozamiento a alta velocidad (dinámico),
- métodos de medición del rozamiento a baja velocidad o estacionarios,
- otros métodos (manuales).

##### 2.1.4.1. Medida del rozamiento a alta velocidad

Los equipos de ensayo a alta velocidad (dinámicos) miden la resistencia al deslizamiento del pavimento a la velocidad del tráfico, en general de 30 a 120 km/h, haciéndolos adecuados para estudios a nivel de red. Se pueden utilizar para ello neumáticos lisos (PIARC 2009R02, ASTM E524) o acanalados (PIARC 2009R03, ASTM E501), pero se considera que los neumáticos lisos son más sensibles a la macrotextura del pavimento. Algunos dispositivos pueden estar equipados además con un sensor de medición de la macrotextura independiente para determinar el gradiente de velocidad-rozamiento. También puede instalarse un sistema adicional para registrar la ubicación transversal de la línea de ensayo.

Para simular las condiciones de superficie mojada se aplica una película de agua, normalmente de 0,5 mm de espesor, delante del neumático de ensayo.

Los equipos de medición a alta velocidad siguen, por separado, uno de los siguientes principios de funcionamiento:

- medición del coeficiente de rozamiento longitudinal (LFC),
- medición del coeficiente de rozamiento transversal (SFC).

### 2.1.4.2. Método de medición del Coeficiente de Rozamiento Longitudinal

Este principio se basa en la medición de la fuerza de rozamiento longitudinal de una rueda de ensayo frenada que se desplaza en línea recta. Los dispositivos de medición de la fuerza de rozamiento longitudinal representan las fuerzas de reacción desarrolladas en la zona de contacto neumático/pavimento y tratan de simular un derrape o deslizamiento del neumático sobre la superficie del pavimento mediante el control de la tasa de deslizamiento.

En función de la relación de deslizamiento del neumático de ensayo los dispositivos de medición del rozamiento longitudinal se clasifican en los siguientes tipos [1]:

**Rueda bloqueada:** Estos dispositivos se instalan en un remolque que se desplaza a una determinada velocidad (**Figura 2.1-1 a**). Durante la medición, el neumático de ensayo desciende lo necesario y se aplica un sistema de frenado para bloquearlo. Se mide la fuerza de arrastre resistente y se promedia durante un tiempo de 1 a 3 segundos tras bloquear completamente la rueda de ensayo. La medición puede repetirse una vez que la rueda alcanza de nuevo un estado de libre movimiento.

**Deslizamiento fijo:** Estos dispositivos (**Figura 2.1-1(b)**) miden la resistencia rotacional del neumático de ensayo al deslizamiento a una velocidad de deslizamiento constante. Durante la medición, la rotación del neumático de ensayo se inhibe hasta un porcentaje de la velocidad del vehículo mediante un mecanismo de cadena/correa o un sistema de frenado hidráulico/eléctrico. La carga sobre las ruedas y la fuerza de rozamiento se miden mediante transductores de fuerza o dispositivos de medición de tensión y par. Por lo general, los datos se registran a intervalos pequeños (de 25 a 125 mm) y se promedian sobre los segmentos de registro.

**Deslizamiento variable:** Estos dispositivos (**Figura 2.1-1(c)**) miden el rozamiento en función del deslizamiento entre la rueda y la superficie del pavimento. Durante la medición, se permite que la rueda de ensayo gire libremente antes de que se reduzca su velocidad. La velocidad del vehículo, la distancia de desplazamiento, la velocidad de rotación de los neumáticos, la carga sobre la rueda y la fuerza de rozamiento se registran, normalmente, a intervalos pequeños (2,5 mm o menos) y se promedian sobre los segmentos de registro.

Algunos de estos dispositivos son capaces de medir la resistencia al deslizamiento por el método de deslizamiento fijo o variable, o con una combinación de ambos.



(a) Rueda bloqueada

(b) Deslizamiento fijo

(c) Deslizamiento variable

Figura 2.1-1 – Ejemplos de dispositivos para la medición del rozamiento longitudinal

### 2.1.4.3. Método de medición del Coeficiente de Rozamiento Transversal

Este principio se basa en la medición de la fuerza de rozamiento lateral (SFC) de un vehículo que se desplaza en curva cuando se giran sus ruedas delanteras, de manera que existe una diferencia entre la dirección del vehículo y el plano de rotación de las ruedas. El valor medido de esta fuerza (SFC) también es válido para rozamiento en dirección longitudinal. La diferencia angular inducida se conoce como ángulo de deslizamiento. Los dispositivos de medición del rozamiento transversal tratan de representar las fuerzas de reacción desarrolladas en el área de contacto neumático/pavimento y de simular el deslizamiento angular del neumático sobre la superficie

mediante el control del ángulo de deslizamiento. Los dispositivos utilizados miden el rozamiento transversal del pavimento o la fuerza de viraje perpendicular a la dirección de marcha de uno o dos neumáticos inclinados con relación a ella. La superficie del pavimento se humedece con una película de agua y se arrastran sobre él una o dos ruedas inclinadas que giran libremente, midiéndose la fuerza transversal, la carga sobre los neumáticos, la distancia recorrida y la velocidad del vehículo. Los datos se registran, por lo general, cada 25 a 125 mm y se promedian sobre segmentos de registro.

(a) *Mu-meter británico*(b) *SCRIM**Figura 2.1-2 – Ejemplos de dispositivos de medición del rozamiento transversal*

Se han llevado a cabo varios proyectos relacionados con la armonización de los dispositivos existentes de medición del rozamiento. Los más conocidos son el Experimento de la AIPCR [2], los Seminarios sobre Rozamiento de la NASA, HERMES [3], TYROSAFE [4] y ROSANNE [5]. Como resultado de los mismos, se han desarrollado dos metodologías:

- el enfoque de dos pasos, desarrollado en los Estados Unidos: basado en el concepto del Índice Internacional de Fricción (IFI), utilizando superficies de referencia a escala de laboratorio y un par de dispositivos que se pueden utilizar tanto en campo como en laboratorio (DFT y CTM);
- el procedimiento basado en el Índice de Resistencia al Deslizamiento (SRI) desarrollado en la Unión Europea: transformando los valores medidos por los distintos dispositivos con sus condiciones de ensayo en valores equivalentes a las condiciones de referencia en una escala común establecida para los grupos de dispositivos basados en un mismo principio de medición.

Por ejemplo, siguiendo las recomendaciones del proyecto ROSANNE, se identificaron tres grupos de dispositivos de medición del rozamiento a alta velocidad en base a sus principios de funcionamiento y a las situaciones de los usuarios de la carretera, tal y como se muestra en la **Tabla 2.1-1**.

<b>TABLA 2.1-1 – GRUPOS ARMONIZADOS DE DISPOSITIVOS DE MEDIDA</b>	
dirección o viraje en condiciones normales	medición de la fuerza transversal con un ángulo de rueda de 20° (34% de relación de deslizamiento)
frenado en condiciones normales	medición de la fuerza longitudinal con bajas relaciones de deslizamiento (15-25 %) cerca del rozamiento máximo (ABS).
deslizamiento después de la pérdida de control	medición de la fuerza longitudinal con altas relaciones de deslizamiento (60-100%), cerca del deslizamiento total.

La comparación entre los métodos americanos y europeos de armonización de las medidas de rozamiento, aplicados a los resultados del primer Seminario Europeo de Rozamiento en Pavimentos (IFSTTAR, Francia 2018), puso de manifiesto que ambos procedimientos pueden mejorar

significativamente la correlación entre los valores de rozamiento medidos por dispositivos muy diferentes [6].

**La Tabla 2.1-2** recoge las características principales de una serie de dispositivos de medición del rozamiento a alta velocidad.

Debido a la alta frecuencia de muestreo y de toma de datos, tanto el grupo de dispositivos de deslizamiento fijo/variable como el de los dispositivos de rozamiento transversal, se conocen como Equipos de Medición Continua de Rozamiento (CFME). Sin embargo, los dispositivos con rueda bloqueada y los dispositivos estacionarios realizan ensayos intermitentes o puntuales. Los CFME pueden medir la resistencia al deslizamiento del pavimento a lo largo de toda la sección de ensayo de una carretera, proporcionando un mayor detalle sobre la variabilidad espacial de sus propiedades de rozamiento.

TABLA 2.1-2 – EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DEL ROZAMIENTO A ALTA VELOCIDAD											
NOMBRE	NORMA O ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	ÁNGULO DE	RELACIÓN DE DESLIZAMIENTO (%)	AJUSTE DE LA RELACIÓN	AJUSTE DESLIZAMIENTO	CARGA SOBRE LA RUEDA (KN)	TIPO DE NEUMÁTICO	BANDA DE	DIMENSIONES DEL NEUMÁTICO	PRESIÓN DE INFLADO (MPa)	ALTURA PELÍCULA DE AGUA (MM)
<b>MEDIDA DEL ROZAMIENTO TRANSVERSAL (SFC)</b>											
SCRIM	CEN/TS 15901-6	20	34			1,96	SCRIM	S	75/508	0,35	0,5
Mu-meter	ASTM E-670	7,5	13								0,5
SKM	CEN/TS 15901-8	20	34			1,96	SKM	S	3/20 in	0,35	0,5
Odoliograph	CEN/TS 15901-13	20	34			2,7	PIARC	S	165 R15	0,23	0,5
<b>MEDIDA DEL ROZAMIENTO LONGITUDINAL (LFC) CON RANGO DE DESLIZAMIENTO BAJO</b>											
GripTester	CEN/TS 15901-7		15			0,25	ASTM 1844	S	∅ 254mm	0,14	0,5
Skiddometer BV-8	CEN/TS 15901-10		14±1			3,5	PIARC	R	165 R15		0,5
BV-11, SFT	CEN/TS 15901-12		17			1,0	Trelleborg T49	P	4,00-8	0,14	0,5
SRM	CEN/TS 15901-11		15±1			3,5	PIARC	R	165 R15		0,5
OSKAR			18	x	x	4,8	ASTM	S			0,5
Via-Friction	CEN/TS 15901-14		18	x	x	0,5	ASTM 1551	S	4,00-8	0,207	0,5
IMAG	CEN/TS 15901-15		15	x		1,5	PIARC	S	165 R15	0,15	1,0
ROAR DK	CEN/TS 15901-5		20	x	x	1,2	ASTM 1551	S	4,00-8	0,207	0,5
TRT	CEN/TS 15901-4		25	x	x	1,0	ASTM	S	4,00-8	0,21	0,5
TWO			18			0,6	ASTM 1551	S	4,00-8		0,5
HFT	ASTM E-2340		13				ASTM 1551	S	4,00-8		0,5
RoadSTAR	CEN/TS 15901-1		18	x		3,5	PIARC	R	165 R15	0,2	0,5
<b>MEDIDA DEL ROZAMIENTO LONGITUDINAL (LFC) CON RANGO DE DESLIZAMIENTO ALTO</b>											
ROAR NL	CEN/TS 15901-2		86	x		1,2	ASTM 1551	S	4,00-8	0,2	0,5
RWS NL SRT	CEN/TS 15901-9		86			1,96	PIARC	S	165 R15	0,18	0,5
Adhera	CEN/TS 15901-3		100		x	2,5	PIARC	S	165 R15	0,18	1,0
SRM	CEN/TS 15901-11		100			3,5	PIARC	R	165 R15	0,15	0,5
Skiddometer BV-8	CEN/TS 15901-10		100			3,5	PIARC	R	165 R15	0,15	0,5
SRT-3			100		x	3,0	PIARC	R	165 R15	0,2	0,5
PFT 1295	ASTM E-274		100		x	4,8	ASTM 524	S			0,5

(\*) S = liso, R = estriado, P = con dibujo

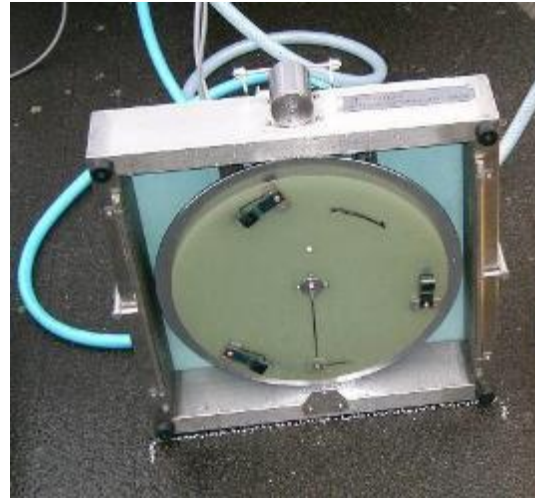
#### 2.1.4.4. Método de medición del rozamiento estacionario o de baja velocidad

Estos dispositivos de medida del rozamiento, fácilmente transportables, son adecuados para su uso en condiciones de laboratorio o para tramos de ensayo cortos o puntuales tanto en la superficie del pavimento como de las marcas viales. Se puede considerar que de forma indirecta miden también la microtextura. Ejemplos de dispositivos estacionarios de rozamiento son el Péndulo Británico de Resistencia al Deslizamiento (**Figura 2.1-3(a)**) y el Medidor Dinámico de Rozamiento (DFT) (**Figura 2.1-3(b)**). Las condiciones de rozamiento del pavimento se miden mediante piezas de goma fijadas a la base del brazo de un péndulo o a un cabezal giratorio, que se deslizan cuando están en contacto con la superficie del pavimento. La pérdida de energía cinética (la tasa de deceleración) se utiliza para obtener un valor que representa la resistencia al deslizamiento del pavimento.

Otros ejemplos de dispositivos de rozamiento a baja velocidad son el PFT (Portable Friction Tester) (**Figura 2.1-3(c)**) y el T2GO (**Figura 2.1-3(d)**). Se trata de dispositivos manuales que actúan a la velocidad de una persona andando que miden el rozamiento longitudinal con un rango de deslizamiento fijo.



(a) Péndulo británico de resistencia al deslizamiento



(b) DFT (Dynamic Friction Tester)



(c) PFT (Portable Friction Tester)



(d) T2GO

Figura 2.1-3 – Ejemplos de dispositivos de medición de fricción estacionarios y de baja velocidad

#### 2.1.4.5. Otros métodos (manuales)

También es posible la medición manual de la distancia de frenado y de la velocidad de deceleración mediante acelerómetros montados en smartphones (teléfonos inteligentes) o en vehículos, aunque se utilizan con menos frecuencia. Estos métodos son fáciles de aplicar pero la repetibilidad de las mediciones es escasa.

### 2.1.5. Indicadores

Se han desarrollado una variedad de indicadores de medición para cuantificar la resistencia al deslizamiento que se describen a continuación.

#### 2.1.5.1. Indicadores de rozamiento longitudinal

- Número de fricción (FN),
- número de deslizamiento (SN), y
- coeficiente de rozamiento longitudinal (LFC,  $\mu$ ).

Estos indicadores se derivan de los dispositivos de medición del rozamiento longitudinal (rueda bloqueada o con deslizamiento fijo). El coeficiente de rozamiento es igual a la fuerza de resistencia horizontal (longitudinal) dividida por la fuerza vertical (carga sobre la rueda) aplicada sobre el pavimento.

Los dispositivos de deslizamiento variable pueden proporcionar adicionalmente:

- número de fricción de deslizamiento longitudinal,
- número de fricción de deslizamiento máximo,
- relación de deslizamiento crítica,
- relación de deslizamiento,
- deslizamiento hasta el número de fricción del derrape, y
- número de fricción estimado.

#### 2.1.5.2. Indicadores de rozamiento transversal

- Número Mu (MuN), y
- coeficiente de rozamiento transversal (SFC and SC).

Estos indicadores se derivan de los dispositivos de medición del rozamiento transversal. El coeficiente de rozamiento es igual a la fuerza horizontal perpendicular al plano de rotación de la rueda dividida por la fuerza vertical (carga sobre la rueda) aplicada sobre el pavimento.

#### 2.1.5.3. Indicadores de mediciones estacionarias

- Número del Péndulo Británico (BPN), basado en la altura de oscilación del péndulo del dispositivo calibrado, y
- el número del DFT (Dynamic Friction Tester – Medidor Dinámico de Rozamiento), proporciona un coeficiente de rozamiento (número DFT) y un gráfico del coeficiente de rozamiento para diferentes velocidades de rotación.

#### 2.1.5.4. Otros indicadores

Otros indicadores son el valor o número de distancia de parada (SDN) o la fuerza de desaceleración. Ambos indicadores pueden expresarse en términos de coeficientes de rozamiento utilizando funciones de correlación.

Existen los siguientes indicadores que tienen en cuenta la armonización de los dispositivos de medición de la resistencia al deslizamiento:

- Índice de Fricción Internacional (IFI) - desarrollado como resultado de un experimento realizado a principios de los años 90 por PIARC para comparar y armonizar los distintos procedimientos utilizados para medir el rozamiento y la textura superficial [2]. El IFI se compone de dos parámetros: la constante de velocidad ( $S_p$ ) y el número de fricción a 60 km/h (F60);

- Índice de Resistencia al Deslizamiento (SRI) - desarrollado sobre la base de los esfuerzos europeos de armonizar la medición de la resistencia al deslizamiento de diferentes dispositivos. De acuerdo con CEN/TS 13036-2, el valor del SRI depende de: la velocidad del vehículo; de la velocidad de referencia a la que se remite la SRI; el gradiente de velocidad de la resistencia al deslizamiento relacionada con la macrotextura de la superficie (MPD) y los parámetros específicos de calibración del dispositivo.

#### 2.1.6. Bibliografía

- [1] Hall, JW, Smith, KL, Titus-Glover, L, Wambold, JC, Yager, TJ & Rado, Z 2009, Guide for pavement friction, NCHRP web-only document no. 108, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- [2] PIARC, Comité Técnico de Características Superficiales (C1), 1995, Experimento internacional de PIARC para comparar y armonizar la medición de la textura y la resistencia al deslizamiento, informe 01.04.T, Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), París, Francia.
- [3] Proyecto HERMES, Informe FEHRL 2006/01.
- [4] Proyecto TYROSAFE, <http://tyrosafe.fehrl.org/>.
- [5] Proyecto ROSANNE, <http://www.rosanne-project.eu/>.
- [6] Cerezo V., Rado Z., Kane M., Comparison of European and American methods for harmonizing friction measurements – results of 1<sup>st</sup> European Pavement Friction Workshop, SURF 2018.

## 2.2. RESISTENCIA A LA RODADURA

#### 2.2.3. Definición

El movimiento de un vehículo de carretera necesita su unidad de potencia para superar la resistencia a la conducción debida a las siguientes fuerzas:

- resistencia a la rodadura,
- resistencia al aire,
- resistencia inercial,
- resistencia a la pendiente,
- resistencia transversal,
- pérdidas de transmisión,
- las pérdidas derivadas de la utilización de equipos auxiliares, y
- rozamiento del motor.

La resistencia a la rodadura es una de las propiedades funcionales más importantes de los pavimentos de carretera. Es aplicable a toda la red de carreteras. La resistencia a la conducción afecta al consumo de energía y a las emisiones de los vehículos.

La medición de la resistencia a la rodadura requiere el uso de equipos avanzados operados por personal cualificado y experimentado. Esto implica que su medida directa sólo se puede realizar en zonas previamente seleccionadas de la red de carreteras. Como la resistencia a la rodadura es causada por una interacción entre el neumático y la carretera, es necesario tener en cuenta ambos factores. Se ha desarrollado una forma menos precisa, pero más práctica, de examinar la resistencia a la rodadura para la gestión de las carreteras, que permite su estimación a partir de parámetros del pavimento que, en muchos casos, ya existen para la mayor parte de la red de carreteras. Estos parámetros incluyen la textura, la regularidad, la rigidez y la topografía de la carretera.



#### 2.2.4. Métodos de medición

Existen métodos de ensayo normalizados para determinar en laboratorio la resistencia a la rodadura de los neumáticos (métodos SAE e ISO), pero ninguno para comprobar la resistencia a la rodadura con los firmes de las carreteras. Debe señalarse que los métodos que se describen a continuación se encuentran, en su mayoría, en fase de desarrollo y sólo se mencionan para dar una idea del estado actual de la técnica. Estos métodos han sido evaluados en el proyecto europeo ROSANNE [1]. Se ha comprobado que las características superficiales del pavimento, como la macrotextura (por ejemplo, MPD) o la regularidad (por ejemplo, IRI), afectan claramente a la resistencia a la rodadura. Otros factores y condiciones de la superficie de la carretera, como la existencia de roderas, de agua (altura del agua) o de nieve también afectan a la resistencia a la rodadura. Actualmente se están desarrollando tres procedimientos para medir la resistencia a la rodadura en lo que se refiere a las propiedades del pavimento: (1) el método del punto muerto, (2) el método de la energía y (3) el método del remolque. Para el seguimiento y la gestión de las carreteras a largo plazo, se sugiere un cuarto método que utiliza un modelo que puede predecir la resistencia a la rodadura a partir de los datos del pavimento.

##### 2.2.4.1. Método del punto muerto

Este método mide el efecto de todas las resistencias cuando el vehículo de ensayo se desplaza libremente (motor desembragado y marcha en punto muerto), desde una velocidad alta a una velocidad inferior en un carril de la carretera. La velocidad se mide de manera continua a lo largo del carril. Las mediciones en punto muerto difieren de otros tipos de mediciones (como la de remolque o la de energía), ya que la velocidad varía a lo largo de la misma. Aunque la velocidad no tiene mucha influencia en la resistencia a la rodadura, pueden afectar a otros factores, y existe un riesgo mayor de correlacionar la resistencia a la rodadura con los errores de medición en lugar de con los parámetros relevantes. Por lo tanto, se recomienda realizar estas mediciones simétricamente en ambas direcciones. Sin embargo, esto no siempre es posible por razones de seguridad vial. El efecto de la resistencia del aire se elimina mediante la determinación del coeficiente del aire con cálculos complejos, ya que la resistencia del aire cambia mucho durante las mediciones debido a las variaciones de velocidad.

La resistencia a la rodadura incluirá también algunas pérdidas en el sistema de transmisión, así como en los rodamientos de las ruedas, que normalmente no se incluyen.



Figura 2.2-1 – Vehículo de ensayo de punto muerto y consumo de combustible

#### 2.2.4.2. El método de la energía

Las mediciones se realizan para determinar la fuerza necesaria para mantener el vehículo en movimiento a una velocidad constante. Esta fuerza puede estimarse por la potencia necesaria o la energía desarrollada por el vehículo. La potencia desarrollada en las ruedas motrices del vehículo puede medirse utilizando un medidor de par especial o puede medirse el consumo de combustible y transformarse en una fuerza utilizando un “mapa de motor” del vehículo de ensayo (una función que transforma la velocidad y el par motor en consumo de combustible). Las pérdidas por rozamiento en el motor y en la transmisión influirán en el resultado.

Una importante desventaja de este procedimiento es que es necesario conocer el coeficiente de aire, que puede determinarse por el método del punto muerto o a través de mediciones en túnel de viento.

#### 2.2.4.3. El método del remolque

Este procedimiento utiliza un remolque equipado con una rueda de medición. El remolque se arrastra a lo largo del tramo de ensayo y se miden las fuerzas de resistencia a la rodadura de forma directa (método de fuerza, **Figura 2.2-2**) o de forma indirecta (método del ángulo, **Figura 2.2-3**). La rueda utiliza un neumático estándar con una determinada carga y presión de inflado, y se miden las fuerzas que hay que superar para mantener una velocidad de referencia constante. Un enfoque alternativo es medir las fuerzas que necesita el vehículo tractor para mover el remolque; en este caso, es necesario eliminar el efecto de la resistencia al aire del remolque. El remolque puede diseñarse para neumáticos de turismo o para neumáticos de camión.



*Figura 2.2-2 – Remolque para el método de la fuerza*



*Figura 2.2-3 – Remolque para el método del ángulo sin parabrisas*

En el proyecto ROSANNE se ha elaborado un proyecto de norma [2] que incluye procedimientos de calibración necesarios para realizar mediciones precisas. El elevado número de variables que intervienen (pendiente de la calzada, aceleración, vehículo tractor, etc.) ponen de manifiesto la complejidad de la medición y la necesidad de que las mediciones sean realizadas y analizadas por técnicos especializados.

También es posible configurar este método sin remolque. En este caso, la rueda se monta en un camión o furgoneta como una rueda adicional sin motor y se miden en ella las fuerzas de forma similar a las del remolque.

#### 2.2.4.4. Modelo de predicción de la resistencia a la rodadura

Probablemente, el método más práctico para la gestión de carreteras a largo plazo es utilizar un modelo que pueda estimar la resistencia a la rodadura a partir de los datos del firme. Esto se hace en muchos modelos, como el modelo Highway Development & Management (actualmente HDM-4). En estos momentos los modelos teóricos están siendo mejorados y actualizados. La

consideración del tipo de vehículo, la incorporación de muchas más características de los firmes, como los efectos de las carreteras húmedas y sucias, o la posición transversal de las ruedas son parte de este nuevo desarrollo.

El fenómeno de “envoltura del neumático” denominado en inglés “Tyre enveloping” consiste en considerar que el neumático sólo entra en contacto con la parte superior de la textura del pavimento y no con el fondo de las estrechas depresiones de éste. Este efecto es importante en la relación entre la textura y la resistencia a la rodadura. En el proyecto ROSANNE se aplicaron procedimientos que consideraban este efecto envolvente que simulaban su influencia sobre los datos de textura, obteniéndose mejores correlaciones con la resistencia a la rodadura [1].

#### 2.2.5. Indicador

Coeficiente de resistencia a la rodadura (Cr o RRC - ambos términos se utilizan indistintamente, ISO 28580 utiliza la notación Cr), representa la característica de la resistencia a la rodadura del contacto neumático/pavimento. Se calcula como la fuerza de resistencia a la rodadura dividida por la carga sobre la rueda. El Cr es adimensional y es una medida relativa. Puede utilizarse para comparar los efectos de distintos neumáticos y tipos de pavimento sobre la resistencia a la rodadura de una rueda cargada. Este coeficiente oscila normalmente entre 0,003 y 0,020 para neumáticos de turismos. Los valores son mucho más bajos para neumáticos de camión, ya que la carga sobre las ruedas es mucho mayor.

#### 2.2.6. Bibliografía

- [1] Anfosso Lédée, F., Cerezo, V., Karlsson, R., Experimental validation of the rolling resistance measurement method including updated draft standard, ROSANNE D3.6, 26 de octubre 2016, disponible en <http://www.rosanne-project.eu/>.
- [2] Bergiers, A., Ejsmont, J., Maeck, J., Zöller, M., Draft standard for a trailer-based rolling resistance measurement method including robust calibration procedures, ROSANNE D3.5, 16 de septiembre 2016, disponible en <http://www.rosanne-project.eu/>.

### 2.3. PROYECCIÓN Y PULVERIZACIÓN DE AGUA

#### 2.3.3. Definición

La seguridad y el confort durante la conducción disminuyen drásticamente cuando se acumula agua en la superficie del pavimento. La película de agua interfiere con el contacto neumático-pavimento y puede producir la proyección y pulverización de esa agua. La expulsión del agua en el contacto neumático-pavimento se produce a través de los canales de la banda de rodadura para incrementar la superficie de contacto con el pavimento.

El contacto neumático-pavimento es esencial para la seguridad de la conducción, la falta de contacto puede producir hidroplaneo y la pérdida del control del vehículo. Sin embargo, la proyección producida por la expulsión de agua puede comprometer la seguridad de la conducción y producir pérdida de visibilidad y otros problemas para los usuarios de la carretera. La cantidad de salpicaduras producida depende de varios factores, entre los que se puede citar el espesor de la lámina de agua, el tipo y velocidad del vehículo, la textura del pavimento y su permeabilidad, el tipo de neumático y las condiciones meteorológicas como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura. Esta combinación de factores hace que se complique el diseño e implantación de los sistemas y modelos creados para calcular la cantidad de agua que se proyecta en estas condiciones.

#### 2.3.4. Método de medición

El Sistema de medida del “Drenómetro a Velocidad de Tráfico” se basa en el registro de la cantidad de agua que proyecta una rueda que circula sobre un pavimento mojado. **La Figura 2.3-1** muestra el sistema básico de medición del dispositivo.

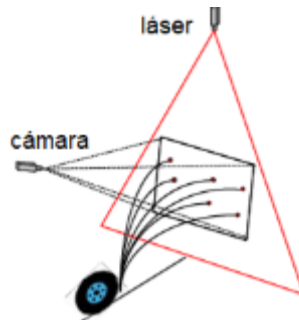


Figura 2.3-1 - Principio de medición del drenómetro a velocidad del tráfico

Observando el principio de medida se entiende que, es necesario proporcionar una cantidad de agua constante y controlada sobre el pavimento delante de la rueda de ensayo para medir la salpicadura y la proyección. Para ello el sistema se instala bajo un remolque estándar, con una cisterna de agua colocada sobre él, que puede ser remolcado por un vehículo comercial. En la **Figura 2.3-2** se puede observar el remolque comercial arrastrado por un sistema de medida SCRIM; obviamente este remolque puede ser arrastrado por cualquier otro vehículo con potencia suficiente para mantener las velocidades de referencia.



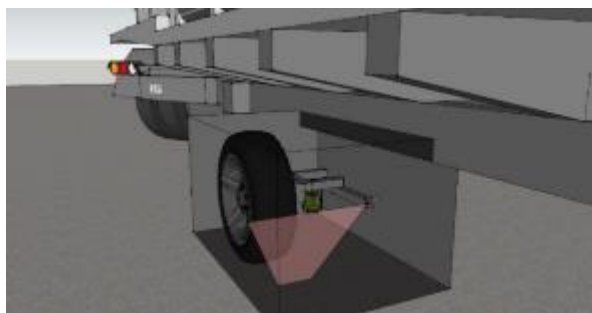
Figura 2.3-2 - Instalación del sistema bajo un remolque de 15 000 litros de capacidad.

El funcionamiento del equipo se basa en simular de forma controlada las condiciones en las que se produce el efecto de la salpicadura y la proyección de agua (splash&spray) y recoger toda la información generada, para tratarla posteriormente mediante análisis de imagen. Para ello se procede a proyectar una cantidad de agua delante de la rueda de medida, que produce una película controlada sobre el pavimento. El equipo genera las salpicaduras sobre la superficie mojada mediante un neumático patrón, de los de uso común en la industria automovilística, lastrado con una carga constante para mantener un contacto permanente en la rodadura.

La salpicadura producida por la rueda se mide al atravesar un plano iluminado por medio de un láser que está colocado de forma precisa tras la rueda. Las gotas y la nube producidas por la rotación de la rueda son captadas por medio de una cámara de alta resolución y alta velocidad que está instalada de forma que no se vea afectada por la proyección de la rueda. La posición del plano láser de medida se ha definido tras un gran número de ensayos en una pista de pruebas con neumáticos de distinto tipo de dibujo y a diferentes velocidades de medida.

El sistema de iluminación y la cámara deben ir protegidos de la luz ambiente, por lo que todo el conjunto está cubierto por una carcasa que protege y mantiene el neumático, el plano de medición y la cámara de alta velocidad en la oscuridad (**Figura 2.3-3**). Todos estos elementos se colocan sobre una estructura que se ajusta entre los ejes delantero y trasero del remolque, para conseguir un

funcionamiento óptimo. El sistema está instalado en el lado izquierdo del remolque para tener en cuenta las salpicaduras que se producen al rebasar a otros vehículos en sentido contrario, o durante los adelantamientos (**Figura 2.3-4**).



*Figura 2.3-3 – Esquema de la rueda de medida bajo el vehículo, el plano de medición y la cámara de alta velocidad*



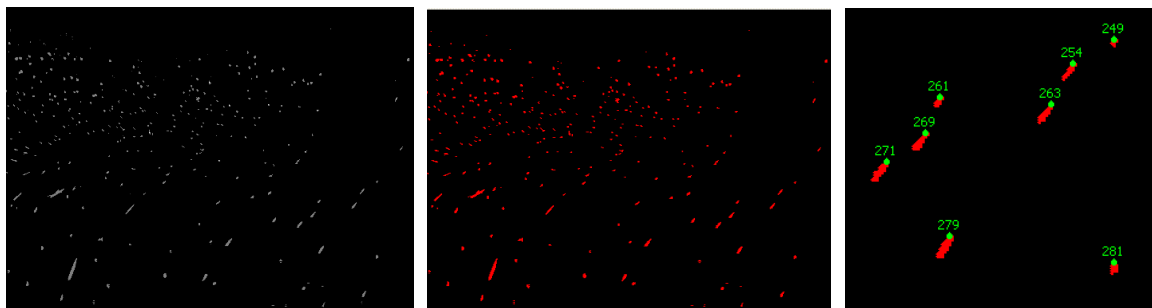
*Figura 2.3-4 - Sistema de medida completo instalado en el lado izquierdo del remolque cisterna entre los dos ejes*

El dispositivo cuenta además con dos sistemas principales complementarios. La salpicadura producida por la rueda dependerá de la capacidad de drenaje de la capa de rodadura y de su macrotextura, por lo que el dispositivo incluye un texturómetro láser complementario que permite obtener la macrotextura del pavimento de forma continua. El sistema está sincronizado a un Sistema de Navegación Inercial y el odómetro del vehículo. Este sistema inercial asistido con GPS permite el posicionamiento de la cisterna y por tanto de los sensores embarcados y la caracterización geométrica del tramo de medida.

### 2.3.5. Indicador

Como resultado final de la medición el equipo proporciona el número de gotas que en un determinado momento atraviesan el plano de medida. La variación del número de gotas, tamaño y posición de éstas, según circula el equipo, permite valorar la drenabilidad de las distintas mezclas empleadas como capa de rodadura en diferentes tramos de carretera.

Sin embargo el número de gotas, su forma y posición, o de forma más general el número de píxeles que en la imagen están ocupados por gotas, no tiene ninguna significación si no se fijan otros parámetros como la velocidad del vehículo de medida, la velocidad de exposición de las imágenes y el número de imágenes que se muestrean por segundo. Además, es necesario definir indicadores más generales que sirvan de media del gran número de imágenes que se adquieren, en aquellos tramos que puedan considerarse como homogéneos en cuanto a drenabilidad. En las siguientes imágenes (**Figura 2.3-5**) se observa el conteo del número de gotas y el número de píxeles ocupados por las gotas que se realiza para medir la cantidad de proyección de agua producida.



*(i) Imagen de la salpicadura*

*(ii) Tratamiento de la imagen*

*(iii) Conteo de gotas y área ocupada por ellas*

*Figura 2.3-5 – ejemplos de la imagen, procesamiento y conteo de gotas*

Como post-proceso y tratamiento de las imágenes adquiridas por el equipo se realiza en una primera etapa una media cada metro (aunque la distancia puede ser variable), del área que ocupa el agua en las imágenes adquiridas en ese intervalo de distancia. Esa media se representa en ejes de coordenadas x-y en función de la distancia.

#### 2.3.6. Bibliografía

- [1] System for measuring splash on wet pavements. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board (TRB), No. 2227, Pavement Management, Volume 3, ISSN 0361-1981, ISBN 978-0-309-16750-5. TRB Publications. Noviembre, 171-179 (2011).
- [2] Equipo para la medida de la proyección de agua y drenabilidad de los pavimentos. Efecto de la velocidad de circulación de los vehículos. Ref.: IBP2337\_11. XVI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA, Rio de Janeiro – Brasil (2011).

### 3. DEFECTOS SUPERFICIALES

#### 3.1. TECNOLOGÍA DE CAPTURA DE IMÁGENES

##### 3.1.3. Introducción

Las actuales políticas de gestión de firmes de las Administraciones de Carreteras están respaldadas por normas, especificaciones y guías de buena práctica. La mayoría de los sistemas se basan en la auscultación del estado de la red utilizando para ello diversos procedimientos y proporcionando diversos tipos de información que es utilizada por los profesionales para la toma de decisiones.

La auscultación a nivel de red obtiene información sobre:

- características de resistencia al deslizamiento,
- medida de roderas y textura,
- medida de fisuras,
- medida del perfil longitudinal,
- capacidad estructural del firme (deflexiones),
- resistencia a la rodadura,
- ruido.

Las campañas de auscultación se diseñan y se llevan a cabo para dar soporte al desarrollo de programas, al mantenimiento programado y a la elaboración de informes de estado. Por lo general, se realizan a velocidad del tráfico para minimizar su interrupción, utilizando vehículos específicos calibrados para garantizar la precisión de los datos. Estas campañas, se realizan, en general, con una frecuencia anual. A partir de ellas, puede ser necesaria la realización de una auscultación más detallada en lugares específicos de la red. Esta auscultación en detalle puede incluir procedimientos menos seguros o que impliquen una mayor alteración al tráfico, requiriendo a veces el cierre de la carretera. En redes con mucho tráfico, los trabajos se programan fuera de las horas punta en horario nocturno. En última instancia, los ingenieros de pavimentos deben confiar en los datos recopilados para adoptar las decisiones de diseño correctas a nivel de red y de tramo/proyecto.

Los nuevos desarrollos tecnológicos, y la rápida mejora de las capacidades de manejo de datos informáticos, han hecho posibles nuevas opciones para la toma de datos de los firmes.

##### 3.1.4. Imágenes 2-D

La auscultación de deterioros mediante imágenes en 2-D se recoge en el informe de 2015.

##### 3.1.5. Modelos 3-D a partir de imágenes

Actualmente las imágenes de alta resolución proporcionan un medio económico de toma de datos. Las actuales técnicas de proceso informático permiten transformar las imágenes de vídeo en modelos digitales tridimensionales, como nube de puntos, de los que pueden obtenerse datos de regularidad y nivelación.

Los algoritmos informáticos emplean un software de visualización que básicamente hace coincidir píxeles de múltiples imágenes del mismo objeto y utiliza la triangulación para determinar un punto en el espacio. Realizado este proceso para cada píxel, se genera una 'nube' virtual de datos que se puede medir y rotar como cualquier modelo gráfico 3D.

El grado de precisión depende de la calidad de la imagen. Los objetos individuales pueden modelarse con precisión utilizando imágenes de 16 MB que se superponen al 70% en sistemas de software como el de Bentley's Context Capture [1].

Se pueden agregar las coordenadas GPS de los puntos conocidos para una mayor precisión y registro real. Aunque el tiempo de proceso (en estos momentos) necesita varias horas, esta

tecnología es asequible y sólo requiere una cámara de buena calidad. Sin embargo, al pasar a imágenes de mayor velocidad se pierde la precisión de la nube espacial. La combinación de estas imágenes con nubes de puntos LiDAR permite que la precisión alcance un nivel en el que se pueden generar modelos 3D. La combinación de ambas tecnologías permite que cada píxel de la nube de puntos generada por los láseres sea coloreado por un píxel de referencia correspondiente en la nube de la imagen. El resultado es un modelo 3D de visualización mucho más realista que la tradicional salida pixelada LiDAR.



Figura 3.1-1 – Combinación de lidar y fotogrametría

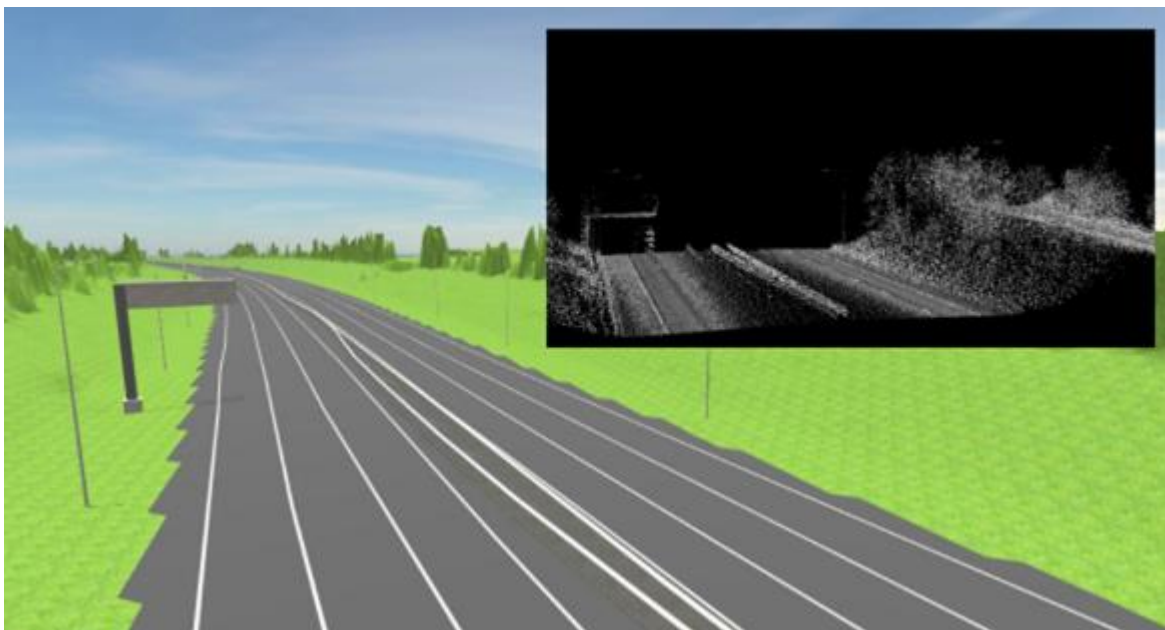


Figura 3.1-2 – combinación de lidar y mapas OS

### 3.1.6. Cámaras de 360°

Las cámaras son una opción mucho más segura que la inspección visual in situ para evaluar el estado del firme y de los elementos de la carretera. Gracias al desarrollo de la tecnología, las cámaras de 360° son cada vez más empleadas con este objetivo. Una fotografía de 360° significa que la imagen panorámica se puede rotar en torno al punto original desde el que se tomó la instantánea. Gracias a la posibilidad de ver el entorno desde diferentes ángulos, las fotografías de 360° permiten al operador realizar una toma de datos y unas estimaciones mucho más precisas. Existe también la posibilidad de añadir los datos LiDAR a la imagen (detrás de la capa de imagen) dando la posibilidad de realizar la medida de distancias en la imagen. Véase el capítulo 6.4 donde se recoge un caso práctico en Estonia en el que se utiliza esta técnica.



### 3.1.7. Uso en firmes

Una vez que se ha creado un modelo preciso, se genera fácilmente información básica como la profundidad de roderas y los perfiles de las carreteras. El verdadero valor para los firmes proviene de que las empresas de software están desarrollando algoritmos que utilizan la medición de la profundidad y el sombreado para poder detectar características tales como la pérdida de áridos o la fisuración que permiten realizar una evaluación del estado de la superficie. Tradicionalmente, este tipo de auscultación sólo era posible bajo la supervisión de un inspector formado, bien sobre la propia carretera o a través de un vídeo de alta definición.



Figura 3.1-3 - 'Assetscape' – Imágenes empleadas para incluir defectos en un modelo 3D

Hoy en día, la auscultación a nivel de red genera enormes cantidades de datos. Por esta razón, es raro que se lleve a cabo más de una vez al año. Por lo general, los datos se utilizan para la realización de inventarios, así como para la auscultación de otros activos recogidos por las imágenes. En cualquier caso, los métodos y las velocidades de proceso están mejorando constantemente.

Las auscultaciones deben llevarse a cabo para los fines previstos. En la actualidad, las auscultaciones de red se llevan a cabo para el seguimiento del estado y la planificación a largo plazo. Este tipo de auscultación no permite cumplir con las necesidades de una conservación ordinaria (por ejemplo, la necesidad de detección frecuente de baches) a menos que se realice y se procese de forma periódica y con una mayor frecuencia.

Es muy probable que en un futuro próximo, los Centros Operativos de Red dispongan de modelos virtuales de sus firmes que permitan la detección automática de defectos superficiales junto con otras características como las intensidades de tráfico o las zonas que acumulan agua. Las Administraciones de Carreteras tendrán que explorar posibles cambios en sus sistemas actuales de auscultación y criterios de rendimiento, así como revisar sus protocolos de actuación para permitir su adaptación a los cambios y oportunidades que ofrecen los desarrollos tecnológicos.

### 3.1.8. Bibliografía

- [1] Bentley's Context Capture, <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>.

## 3.2. CÁMARAS DE INFRARROJOS

### 3.2.3. Definición

La termografía infrarroja (IRT), las imágenes térmicas y el vídeo térmico son ejemplos de imágenes infrarrojas. El infrarrojo es una región del espectro de radiación electromagnética en la que las longitudes de onda oscilan entre 700 nm y 1 mm.

Una cámara infrarroja o termográfica es un dispositivo que detecta y compone una imagen térmica 2D. Este tipo de cámaras suelen detectar la radiación en el rango lejano de infrarrojos del espectro electromagnético (7,5-14  $\mu\text{m}$ ) y generan imágenes de esa radiación, denominadas termogramas. Los termogramas individuales pueden editarse y ordenarse en secuencia, lo que conduce a la creación del mapa de temperaturas del pavimento medido.

### 3.2.4. Método de medición

Los defectos y diferencias del firme pueden registrarse gracias a la diferencia de temperaturas en esas zonas. Para poder llevar a cabo una buena medición es necesario que exista un contraste de temperaturas en la superficie del firme. La temperatura de los firmes asfálticos cambia con la temperatura ambiente y la radiación solar durante el día. Las diferencias en las características del material y la aparición de defectos produce cambios en la transferencia de calor del firme de la carretera. Los mejores resultados se obtienen en los días soleados, cuando el tiempo ayuda a crear un contraste de temperaturas en la superficie del firme. A la hora de evaluar los resultados de la medición deben tenerse en cuenta las diferencias provocadas por las sombras, por ejemplo, de los árboles.

Las cámaras térmicas generalmente no alcanzan la misma resolución que las cámaras digitales convencionales. La resolución mínima recomendada para este fin es de 640 x 480 píxeles. La alta resolución permite más precisión y muestra más detalles.

Hay dos tipos de cámaras térmicas dependiendo del tipo de detector: refrigeradas y no refrigeradas. Para la grabación en movimiento es mejor utilizar una cámara térmica con detector de enfriamiento porque las velocidades de imagen son mucho mayores. El tiempo de respuesta de las cámaras refrigeradas es alto y utilizan un obturador global de manera que la lectura de todos los píxeles se realiza de manera simultánea, lo que permite la captura de imágenes y las mediciones en objetos en movimiento sin que la imagen se vea borrosa. Durante la medición la cámara puede colocarse bajo una carcasa que la proteja y fijarse al vehículo de medida junto con una cámara de alta definición.



Figura 3.2-1 – Vehículo de medida con cámara térmica fijada a un soporte de techo (izquierda) y cámara térmica con detector de enfriamiento (derecha)

La forma y velocidad de las mediciones IRT dependen de tres elementos básicos:

- la cámara de infrarrojos,
- el vehículo de medición para el caso no estático,
- el ordenador para la toma de datos.

Existen tres sistemas básicos de imágenes térmicas según su uso:

- manual (medición estática y local que permite la máxima precisión de medición);
- móvil-terrestre (medición continua desde un vehículo en movimiento, adecuada para estructuras lineales como una carretera), en este capítulo se describe este sistema con más detalle;
- móvil-aérea (medición global desde un avión o un dron, adecuado para mediciones en lugares remotos e inaccesibles).

Posibles aplicaciones:

- cartografía térmica de firmes durante la extensión y compactación de capas asfálticas (control de la homogeneidad y de las temperaturas reales, por ejemplo, en caso de utilización de mezclas a baja temperatura –semicalientes o templadas-), **Figura 3.2-2**;
- identificación de deterioros del firme (fisuración, delaminación de la capa de rodadura, entrada de agua por la superficie del firme, etc.);
- localización de juntas/juntas selladas, **Figura 3.2-3**, y zonas de parcheo, **Figura 3.2-4**;
- posicionamiento de la señalización vial, **Figura 3.2-3**.

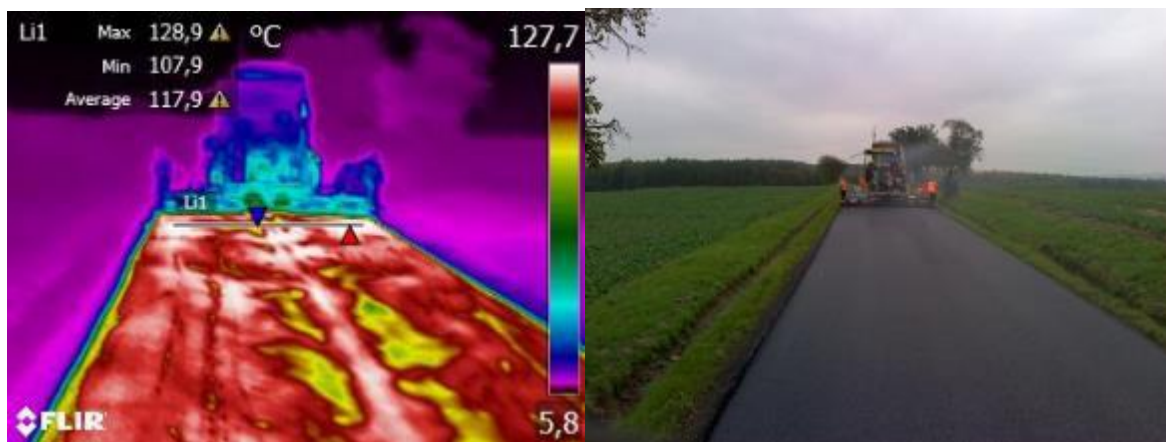


Figura 3.2-2 – Mapa térmico durante la extensión y compactación de capas asfálticas

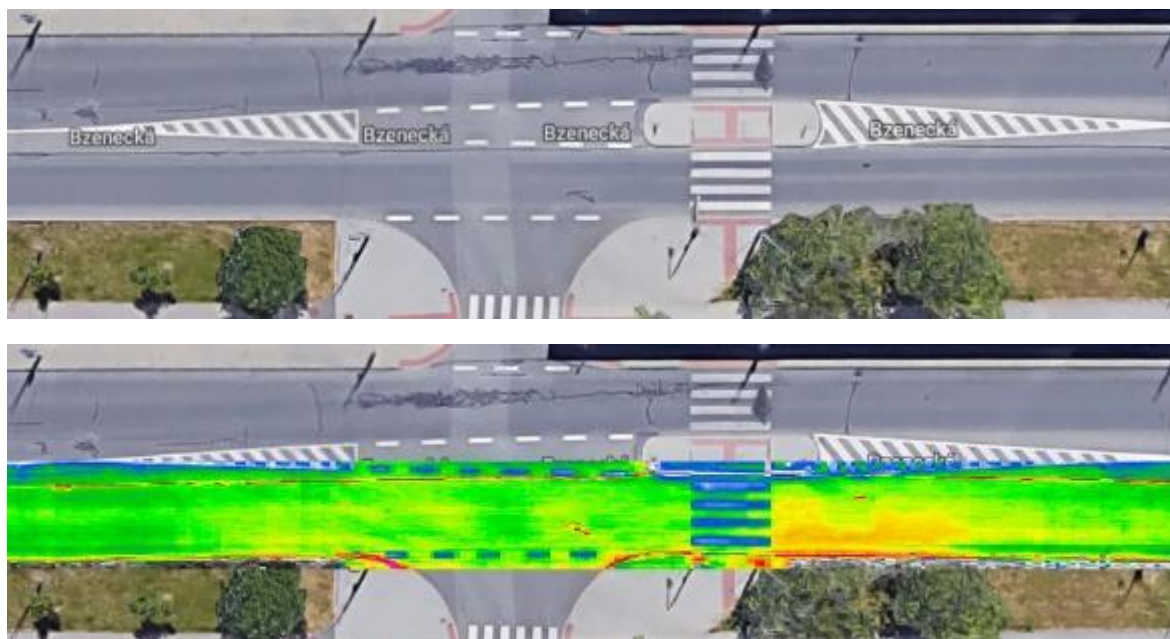


Figura 3.2-3 – Localización de juntas y posicionamiento de marcas viales

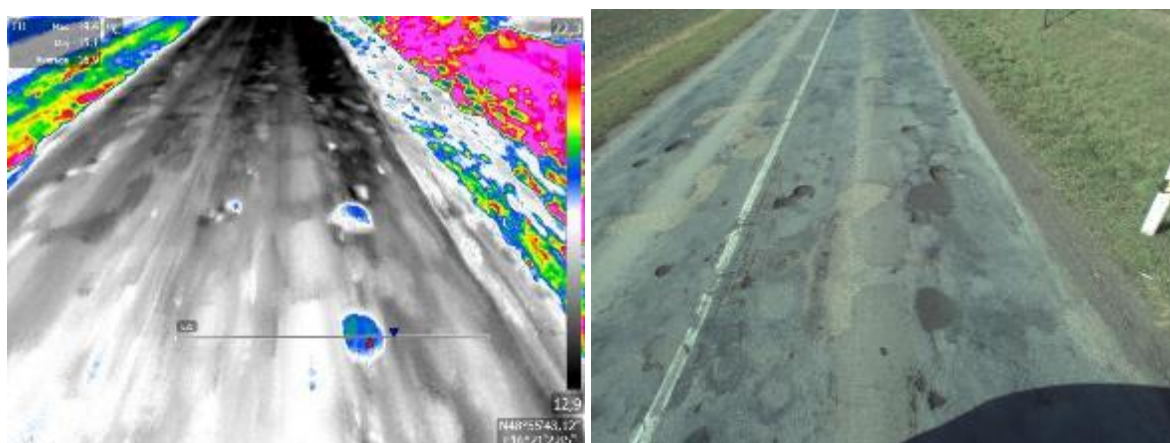


Figura 3.2-4 – Localización de zonas de baches

Los datos de imágenes térmicas suelen combinarse con los datos de otros métodos de ensayo no destructivos (NDT), como la grabación de vídeo, el escaneo láser, el georadar, etc. para evaluar el estado del firme.

En la actualidad, este método no se utiliza de forma regular para el diagnóstico de las carreteras. La aplicación más común de la IRT es el control de calidad durante la ejecución de nuevas capas de pavimento asfáltico en las que la cámara térmica se utiliza en obra.

### 3.2.5. Indicadores

Los resultados de las mediciones IRT en carretera son termogramas o mapas térmicos, en los que se identifican y localizan puntos potencialmente problemáticos, que se correlacionan con los registros y los resultados de las mediciones realizadas por otros métodos de diagnóstico.

No se utilizan indicadores o índices específicos para interpretar los resultados de las mediciones IRT.

### 3.2.6. Bibliografía

- [1] Nondestructive testing to identify delaminations between HMA layers, SHRP 2 (Strategic Highway Research Program 2) report, Transportation Research Board, USA, 2013.

- [2] Solla M, Lagüela S et al. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings, NDT&E Int. 62 pp 55-65, 2014.
- [3] Marchetti M, Moutton S et al. Implementation of an infrared camera for road thermal mapping, 10th Int. Conf. on Quant. InfraRed Thermography (Québec City) ed X Maldaque, 2010.
- [4] Application of thermography in diagnostics of transport infrastructure, Czech methodology, result of project No. TE01020168, CDV-Transport Research Centre, 2016.
- [5] UUS A, Liatsis P et al. NDT Sensor Fusion: Optimisation of NDT Sensor Data Processing Strategies for Road Infrastructure Inspection, 2016: [https://blogs.city.ac.uk/fp7-rpbhealtec/dissemination\\_materials/](https://blogs.city.ac.uk/fp7-rpbhealtec/dissemination_materials/)
- [6] FLIR thermal imaging cameras help determine road conditions in Finland: <http://www.flir.co.uk/automation/display/?id=41448>

## 4. ESTADO ESTRUCTURAL

### 4.1. DEFLECTÓMETRO A VELOCIDAD DE TRÁFICO TSD

#### 4.1.3. Definición

Es difícil de medir de forma directa la capacidad de un pavimento para soportar las cargas del tráfico y las condiciones ambientales a lo largo de su vida útil. Para ello, se utilizan tanto ensayos destructivos como no destructivos. Los métodos destructivos consisten en la extracción de muestras del firme para realizar sobre ellas ensayos de laboratorio para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia del material. Los métodos no destructivos suelen consistir en la medición de las deformaciones de la superficie del firme producidas por la carga de las ruedas de un vehículo pesado.

En los últimos 50 años se han desarrollado una variedad de equipos de medición de las deformaciones de la superficie del firme bajo la acción las ruedas a baja velocidad o bajo la acción de cargas dinámicas. Entre estos equipos se encuentra la viga Benkelman, el Dynaflect, el Deflectógrafo Lacroix (y otros deflectógrafos de diseño similar), el Curvímetro y el Deflectómetro de Impacto (FWD). Estos dispositivos toman medidas mientras están colocados estáticamente sobre el pavimento, o mientras circulan sobre él a baja velocidad.

El Deflectómetro a Velocidad de Tráfico (TSD) es el primer equipo de medida de la deflexión que realiza sus mediciones a velocidades similares a las de otros usuarios de la carretera [1]. Dado que se mide la respuesta del firme a una carga dinámica real, es de suponer que las mediciones del TSD estén más cerca de la realidad que, por ejemplo, las mediciones del FWD.

Tras el desarrollo del prototipo inicial a principios de los años 90, la empresa Greenwood Engineering A/S, con sede en Dinamarca, ha fabricado más de diez equipos TSD que están operativos en los siguientes países: Dinamarca, Reino Unido, Italia, Polonia, Sudáfrica, Australia (dos unidades), China, Estados Unidos y Alemania.

El equipo permite, de forma rápida, la medición de la deflexión del firme de grandes redes de carreteras. En Dinamarca, desde el año 2005 el TSD ausculta cada año la red de carreteras estatales, cada dos años las principales autopistas, y cada tres años las autovías [2]. Tomando como base los resultados de esta auscultación se realizan mediciones más detalladas con Deflectómetro de Impacto (FWD) en aquellas secciones en las que las mediciones de TSD señalan la existencia de problemas de capacidad portante.

En sus primeros 5 años de funcionamiento, el primer TSD australiano auscultó más de 200.000 km de carreteras en Australia y Nueva Zelanda [3].

#### 4.1.4. Método de medición

##### 4.1.4.1. Detalles técnicos del TSD

El TSD consta de una unidad tractora y un semirremolque con un eje de 10 toneladas con ruedas gemelas, como se muestra en la **Figura 4.1-1**. La carga de 10 toneladas por eje corresponde a la carga de diseño. El TSD funciona a velocidades de hasta 80 km/h, que suele ser el límite legal de velocidad para camiones. En carreteras que cuentan con buena regularidad superficial, el TSD proporciona resultados fiables a velocidades comprendidas entre 30 km/h y 90 km/h.

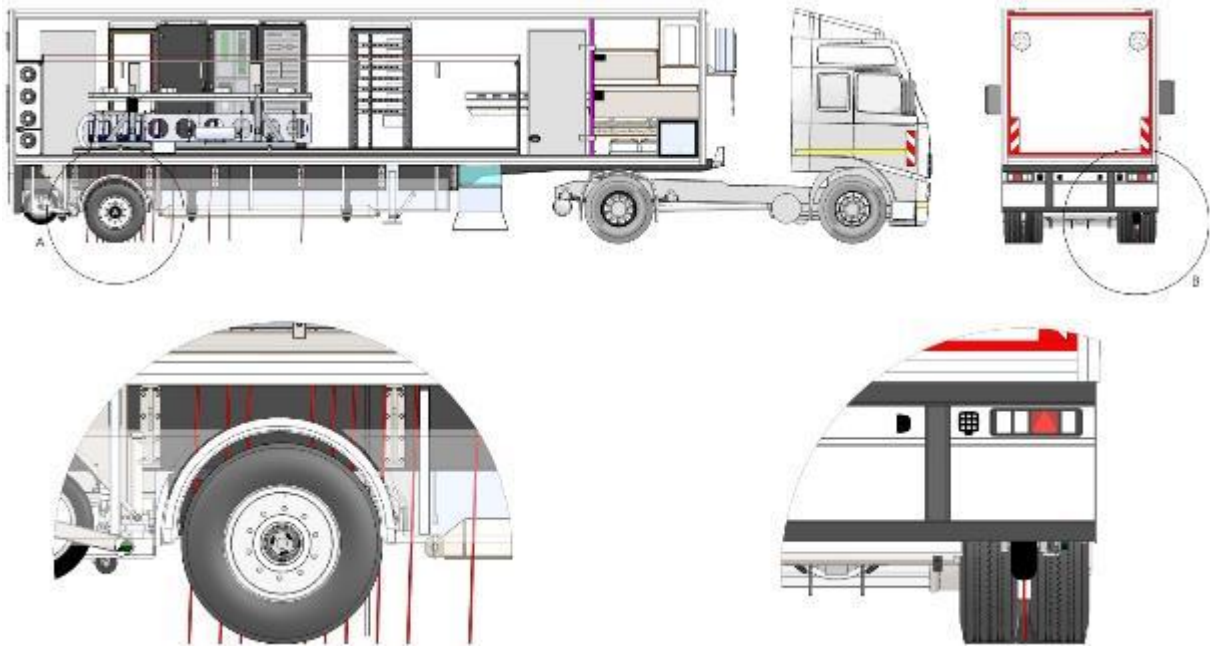


Figura 4.1-1 – Cómo funciona el TSD (fuente: Greenwood Engineering)

El TSD no mide directamente la deflexión del firme, sino que mide la velocidad de la superficie del firme deformado mediante una serie de sensores láser Doppler. Los primeros modelos de TSD tenían tres sensores de medición y un cuarto sensor de referencia. Los equipos TSD posteriores incorporan más sensores y pueden proporcionar datos del cuenco de deflexiones completo. La carga típica aplicada es una carga de 10 toneladas en un eje simple con ruedas gemelas.

El TSD recoge un flujo continuo de datos de velocidad vertical ( $V_v$ ) y horizontal ( $V_h$ ) en intervalos de 20 mm. Por lo general, los datos procesados se dan a intervalos de 10 m, si bien el usuario puede especificar cualquier otra distancia.

Para transformar los datos de velocidad en forma de deflexión superficial existen diversos procedimientos que se describen en el apartado 4.1.3.

#### 4.1.4.2. Condiciones de funcionamiento

Diversos estudios han puesto de manifiesto que el TSD:

- puede trabajar a velocidades comprendidas entre 30 y 90 km/h con una interferencia mínima para los otros usuarios de la carretera y, por tanto, sin que sean necesarias medidas adicionales de control del tráfico;
- puede dar resultados repetibles;
- no puede tomar datos fiables sobre un pavimento mojado;
- no puede tomar datos fiables a velocidades bajas (en estos casos, los valores dependen de la velocidad de circulación);
- pueden efectuar una auscultación a nivel de red en un período de tiempo relativamente corto en comparación con otros procedimientos.

#### 4.1.5. Indicadores

Se ha desarrollado una serie de indicadores de deflexión basados en mediciones de TSD.

**$V_v/V_h$  (pendiente):** El TSD mide la velocidad de la superficie deformada del firme. Para su aplicación práctica los datos de partida de las velocidades verticales ( $V_v$ ) del pavimento deformado se dividen por la velocidad horizontal ( $V_h$ ) del vehículo para obtener un término denominado "pendiente" ( $V_v/V_h$ ). De esta forma, se anula el efecto de la velocidad de desplazamiento del vehículo sobre el

valor de la velocidad vertical, lo que proporciona datos TSD independientes de la velocidad de ensayo. Este es un aspecto muy útil dado que el equipo TSD no puede circular siempre a una velocidad fija.

**SCI300 (D0-D300):** Durante el desarrollo del TSD en Dinamarca, los esfuerzos se centraron en expresar las mediciones de una manera familiar para los profesionales acostumbrados a utilizar datos de otros sistemas de medición de la deflexión. El parámetro SCI300 -la diferencia entre la deflexión máxima y la deflexión medida a una distancia de 300 mm de la máxima- se utiliza en Dinamarca como un indicador de la deflexión del firme. Por esta razón, los datos de la pendiente se utilizan para dar una estimación del parámetro SCI300. Hay dos formas diferentes, incorporadas en el software de proceso, para calcular este parámetro. En términos sencillos, los diferentes métodos de cálculo utilizan diferentes medios matemáticos para estimar la deformación máxima, ya que el sistema TSD no mide la deformación máxima producida por la carga aplicada.

**Deflexión máxima (D0):** La deflexión máxima de la superficie bajo el eje de ensayo puede estimarse utilizando el software o mediante ejercicios de correlación utilizando ensayos de contraste con TSD y otro dispositivo de deflexión, por ejemplo, el deflectómetro de impacto (FWD). El software utiliza modelos matemáticos del comportamiento del firme para determinar la deformación máxima, mientras que el enfoque de correlación es empírico. Pueden utilizarse también procedimientos alternativos para estimar la deflexión máxima. El procedimiento utilizado en Australia consiste en estimar la deflexión máxima a partir del cuenco teórico de deflexiones determinado por el *método del área bajo la curva*.

**Área bajo la curva (AUTC):** El método AUTC [4] fue desarrollado en Australia. El método integra la línea matemática que mejor se ajusta a los datos recogidos para una zona de ensayo dada. De este modo se obtiene un cuenco de deflexiones teórico completo para la zona de ensayo, del que se puede obtener cualquier parámetro de deflexión, incluida la deflexión máxima. El método realiza varios supuestos, como que la deflexión máxima del firme se produce exactamente bajo la rueda cargada.

**(Modificado) Número estructural:** El número estructural, utilizado por sistemas de gestión como el HDM-4, puede estimarse utilizando datos del TSD. Hasta la fecha, esto se ha hecho determinando primero una correlación entre la deflexión medida con TSD y la deflexión medida con FWD, y utilizando después ecuaciones preexistentes para predecir el número estructural a partir de los datos del FWD. Una forma más directa sería estimar directamente el número estructural a partir de los datos de la pendiente, un procedimiento que aún no se ha desarrollado.

#### 4.1.6. Bibliografía

- [1] Rasmussen, S & Hilderbrand, G 2002, 'Non-contact deflection measurement at high speed', in: AG Correria & FEF Branco (eds), *6<sup>th</sup> International conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields*. Lisboa, Portugal, pp.53-60.
- [2] Baltzer, S 2009, 'Three years of high speed deflection measurements of the Danish state roads network', in E Tutumuler & AL Al-Qadi (eds), *Bearing capacity of roads, railways and airfields*, Taylor and Francis, Londres, pp. 443-7.
- [3] Wix, R, Murnane, C & Moffatt, M 2016, 'Experience gained investigating, acquiring and operating the first Traffic Speed Deflectometer in Australia', 6<sup>th</sup> Transport Research Arena (TRA2016), Warsaw, Poland, *Transportation Research Procedia*, vol. 14.
- [4] Muller, WB & Roberts, J 2013, 'Revised approach to assessing Traffic Speed Deflectometer data and field validation of deflection bowl parameters', *International Journal of Pavement Engineering*, Vol 14, pp. 388-402.



## 4.2. GEORADAR

### 4.2.3. Definición

El Georadar (GPR) puede utilizarse para una amplia gama de aplicaciones en diagnósticos no destructivos y en diversos campos como la arqueología, la geología, la medicina forense y la ingeniería civil (inspección de puentes, edificios y carreteras).

La técnica GPR se basa en la medición del tiempo de desplazamiento y la amplitud de reflexión de un pulso electromagnético transmitido a través de un firme y reflejado después parcialmente por las interfaces eléctricas dentro de la estructura. Por lo general, los sistemas tienen tres componentes: un generador de pulsos, que genera un solo pulso a una frecuencia central dada, una antena que transmite los pulsos al medio y captura la señal reflejada, y un registrador que toma muestras de las señales reflejadas y las convierte en un formato adecuado para su almacenamiento informático [1].

Para diferentes aplicaciones, se utilizan sistemas con una o varias antenas de diferentes frecuencias, o se utiliza todo el campo de antenas para aplicaciones 3D (**Figura 4.2-1**).



*Figura 4.2-1 – Sistema GPR con una sola antena para mediciones A velocidad de tráfico (izquierda) y sistema GPR con múltiples antenas para mediciones 3D (derecha, [2])*

Las mediciones pueden llevarse a cabo a nivel de red de carreteras o a nivel de proyecto. Las mediciones a nivel de red se realizan en dirección longitudinal a alta velocidad, de manera que no se afecta al tráfico. Las mediciones a nivel de proyecto pueden incluir aplicaciones especiales y requerir una medición en dirección transversal realizada a velocidad lenta/caminando con regulación del tráfico (**Figura 4.2-2**).



*Figura 4.2-2 – Sistema GPR para mediciones a velocidad de marcha (izquierda) y medición local GPR con diferentes posiciones de antena transmisora y receptora (derecha)*

Una de las primeras aplicaciones del GPR en la ingeniería vial fue la determinación en continuo de los espesores de capa del firme, centrándose en las capas ligadas, principalmente las capas de pavimento asfáltico.

Otra aplicación extendida es la localización de la armadura (pasadores y barras de atado) en pavimentos de hormigón en masa, armaduras en pavimentos de hormigón armado continuo (CRCP) o, en su caso, mallas electrosoldadas. En el caso de un armado denso, la posibilidad de diagnosticar las capas subyacentes es limitada o imposible.

El objetivo de otras aplicaciones es la localización de deterioros ocultos (bajo la superficie), zonas con delaminación de capas, huecos, etc. y la evaluación de su gravedad.

A continuación se muestran aplicaciones individuales de los diagnósticos de firmes con GPR, clasificados en aplicaciones comunes y de investigación [2]:

Aplicaciones comunes:

- espesor de las capas de pavimento asfáltico;
- espesor de la capa de pavimento de hormigón (con o sin pasadores, barras de atado o armaduras);
- espesor de capas de subbase ligadas o no ligadas;
- posición de la armadura en pavimentos de hormigón;
- despegue y delaminación entre capas del firme;
- heterogeneidad u homogeneidad del firme;
- cambio de la estructura del firme;
- identificación de huecos (por ejemplo, bajo losas de hormigón, como resultado de la erosión por agua);
- identificación de daños por helada, etc.

Aplicaciones de investigación:

- estado de la armadura en pavimentos de hormigón (por ejemplo, corrosión);
- profundidad de las grietas de superficie;
- localización de iniciación de fisuras de arriba-a abajo;
- predicción de bombeo en el pavimento;
- heterogeneidad del pavimento, por ejemplo, contenido de humedad, contenido de huecos de aire, nivel de compactación, segregación de los áridos.

Los mayores fabricantes y operadores de sistemas GPR son miembros asociados de la Asociación Europea EuroGPR (<http://www.eurogpr.org>). Varios de estos fabricantes y operadores han desarrollado internamente un software para procesar y evaluar los datos de campo recopilados.

Los resultados de la medición de GPR se combinan a menudo con datos de las características superficiales del firme, por ejemplo la regularidad, o con datos de las características estructurales, como la capacidad portante.

A nivel nacional, existen directrices y reglamentos para el diagnóstico del estado de la infraestructura de transporte mediante GPR, por ejemplo, las directrices de 2011 del proyecto Mara Nord [3]. Más recientemente, la Asociación Europea de GPR publicó una guía para estudios estructurales de firmes [4] y el BRRC publicó una metodología para la auscultación del estado de las carreteras [5].

No existe ninguna norma europea que aborde el diagnóstico de los firmes de carreteras con GPR. Varias normas americanas se ocupan de ello. La ASTM D6432-11 [6] es probablemente la norma más detallada sobre el uso del GPR para el diagnóstico de las propiedades del subsuelo en suelos,

rocas y otros materiales, incluyendo los utilizados para la construcción de carreteras. La norma ASTM D4748-10 [7] se refiere exclusivamente a la aplicación del GPR para la determinación del espesor de las capas de pavimento ligadas.

#### 4.2.4. Método(s) de medición

La velocidad de propagación de la señal a través de las capas del firme está relacionada con la constante dieléctrica relativa  $\epsilon$  del material (en resumen, la constante dieléctrica). Esta velocidad es necesaria para el cálculo del espesor de la capa. Los métodos más utilizados para determinar las velocidades de la señal son los siguientes [2]:

- utilización de datos publicados disponibles de velocidades medias de los materiales de firmes - es el método menos preciso empleado sólo para interpretaciones preliminares (la presencia de humedad en el material afectará en gran medida a la velocidad);
- métodos de toma de testigos - proporcionan información específica de puntos en áreas seleccionadas del firme (localizadas de forma ideal en secciones con características homogéneas, a menudo utilizadas con fines de calibración);
- Técnica del Punto Medio Común (CMP) - utiliza antenas que miden con diferentes posiciones de transmisor y receptor con relación a un punto central (información específica del punto o información continua de un conjunto de antenas);
- Técnica de Reflexión y Refracción de Gran Ángulo (WARR) - utiliza un conjunto de antenas que miden con diferentes posiciones del receptor desde el/los transmisor/es (información específica del punto o información continua desde un conjunto de antenas);
- Técnica de Coeficiente de Reflexión - calcula la velocidad de la medición de la antena usando una placa de metal en la superficie del firme antes de comenzar la medición.

La elección de la antena es de suma importancia para aplicaciones específicas. Por ejemplo, la profundidad de penetración típica en materiales de firmes para antenas con frecuencia central de 400 MHz es de unos 4 m, para 1000 MHz es de unos 0,9 m y para 2600 MHz es de unos 0,4 m.

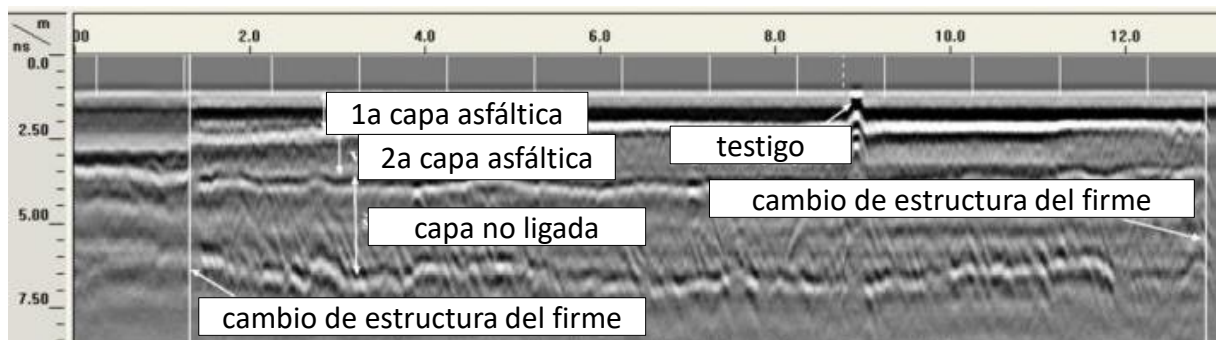


Figura 4.2-3 – Resultado de la medición GPR realizada con una antena de 1,6 GHz (radargrama, encadenamiento en función del tiempo de recorrido) a partir de una sección de carretera de 13 M de longitud con cambio visible de la estructura del firme

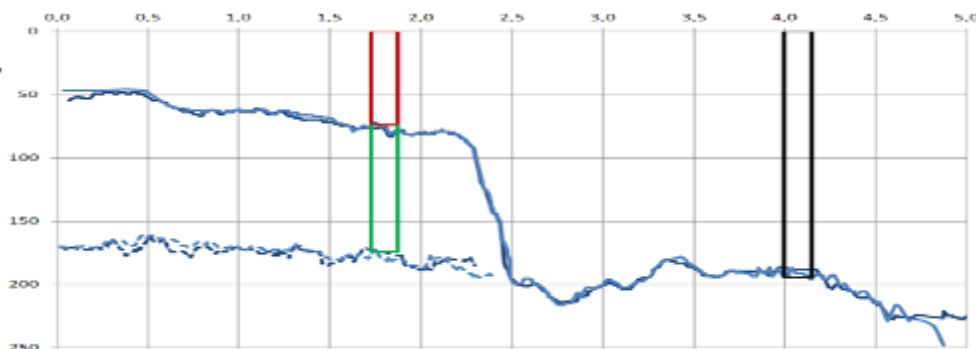
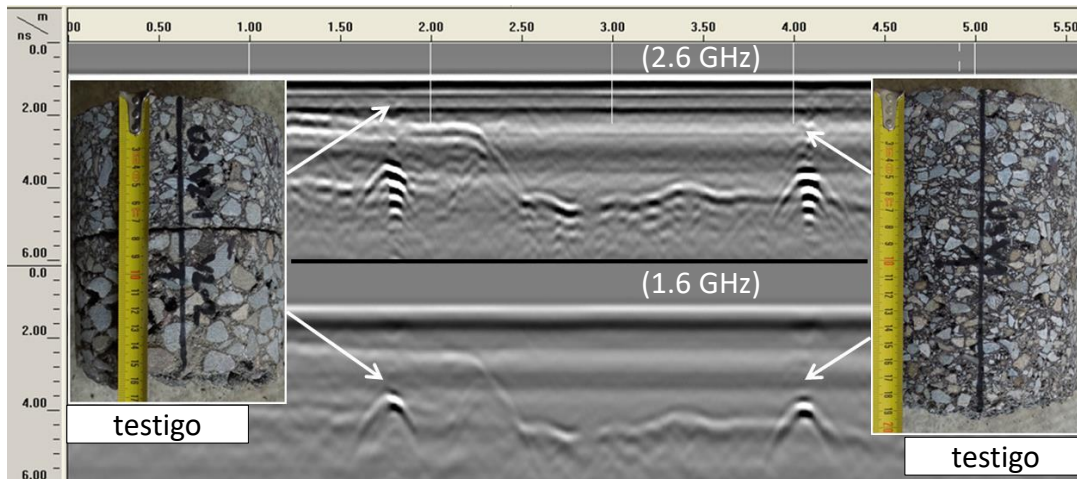


Figura 4.2-4 – Radargrama de medición GPR realizada con antena de 2,6 GHz (arriba), luego antena de 1,6 GHz (centro) en dirección transversal de la carretera y su interpretación de profundidad (abajo) con dos testigos de calibración

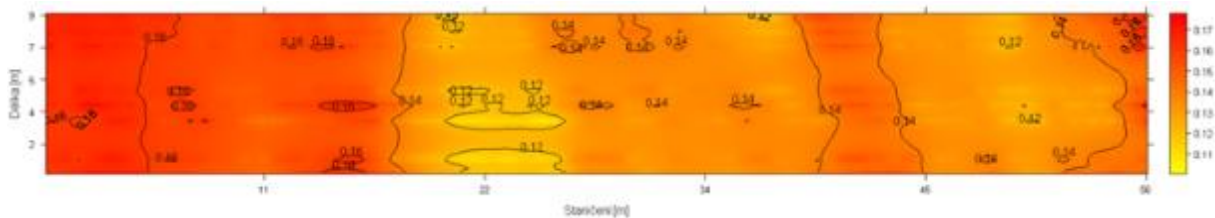


Figura 4.2-5 – Interpretación 2D del espesor de la capa asfáltica medida por el sistema GPR multicanal, la anchura del pavimento es de 9 m y su longitud de 56 m

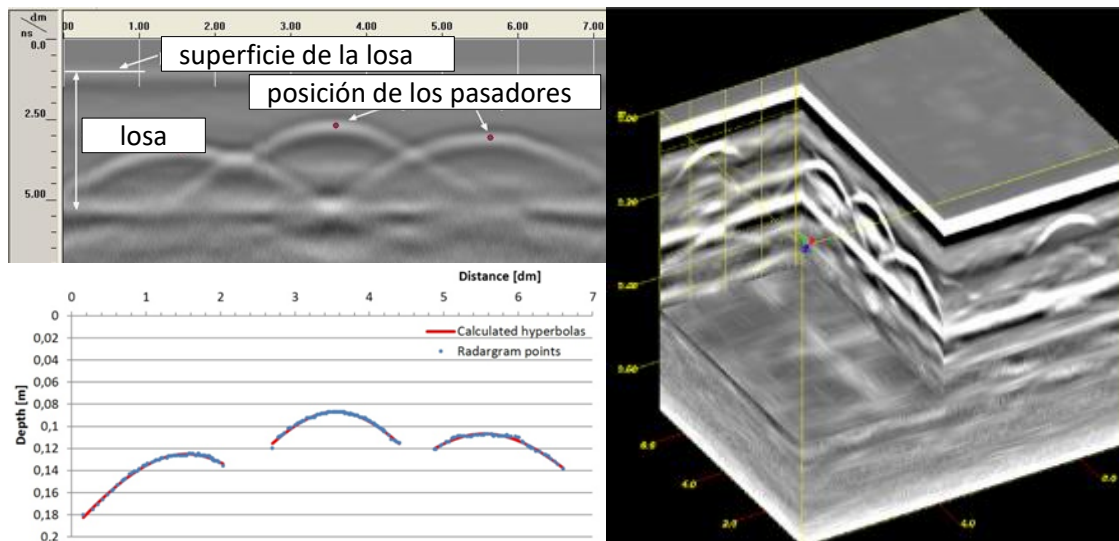


Figura 4.2-6 – Radargrama de las mediciones GPR realizadas en una losa de hormigón con 3 pasadores y su interpretación en profundidad (izquierda) y 3D (derecha)

La localización de los datos de medición del GPR se realiza normalmente utilizando un odómetro o en combinación con otros sistemas como el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) y el Sistema de Navegación Inercial (INS) [8].

La interpretación de los datos medidos con GPR no es sencilla y puede tener un impacto significativo en los resultados finales del diagnóstico.

Las cuestiones básicas que deben abordarse para mejorar en la práctica el uso del Georadar son [2]:

- optimización de la configuración del equipo para aplicaciones específicas - número de canales, frecuencia de la antena, velocidad de medición, forma de localización del punto de medición, etc. (está relacionado con la optimización de los costes y el tiempo requerido de las aplicaciones GPR individuales);
- determinación de la precisión de medición (en profundidad) - aceptación de esta precisión para aplicaciones básicas, especialmente para la determinación de espesores de capa en firmes de carretera y la localización de armaduras;
- optimización más rápida de la medición - medición en 3D frente a la medición en línea (en dos direcciones perpendiculares);
- minimización del número de testigos con fines de calibración - el uso de CMP (Punto Medio Común), WARR (Reflexión y Refracción de Gran Ángulo) y otras técnicas;
- el procedimiento de cómo se pueden integrar los resultados de las mediciones en las bases de datos y en los sistemas de gestión de los administradores de carreteras (por ejemplo, los espesores de capa).

Se están abordando las cuestiones básicas anteriores. En el futuro será necesario abordar otros temas [2], como por ejemplo:

- mayor grado de automatización en la evaluación de los datos medidos por aplicaciones específicas;
- ampliar la formación del personal para las diferentes aplicaciones de GPR en términos de medición y evaluación de datos (mayores necesidades de personal cualificado con suficiente práctica);

- integrar este método no destructivo y sus diferentes aplicaciones en las normas europeas y en las especificaciones técnicas nacionales;
- organizar ensayos comparativos de dispositivos individuales a nivel nacional e internacional para diferentes aplicaciones de GPR (se realizan ensayos similares para otros equipos que miden parámetros variables del firme como, por ejemplo, regularidad superficial, resistencia al deslizamiento o capacidad portante).

#### 4.2.5. Indicadores

Normalmente no se utilizan indicadores o índices.

El resultado de la medición del espesor de capa es una profundidad calculada en distancias medidas, que puede promediarse de acuerdo a los requerimientos, por ejemplo, cada 1 m, 5 m o para distancias mayores. El resultado de la medición de la ubicación de una barra corrugada es una posición en planta y su profundidad calculada. Estos datos se resumen normalmente en informes que incluyen interpretaciones gráficas, tablas y evaluación de estos datos en comparación con los requisitos especificados.

Los diagnósticos GPR permiten a los usuarios identificar secciones homogéneas de una carretera según su estructura o estado y localizar la posición de los defectos estructurales que no son visibles desde la superficie del firme.

#### 4.2.6. Bibliografía

- [1] Saarenketo, T., Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43, 2000, p. 119-138.
- [2] Stryk, J., Alani, A.M., Matula, R., Pospisil, K. Innovative inspection procedures for effective GPR surveying of critical transport infrastructures (pavements, bridges and tunnels), chapter in the book: *Civil engineering applications of ground penetrating radar*, Springer International Publishing Switzerland, 2015, p. 71-95 (outcome of COST TU 1208 action).
- [3] Recommendations for guidelines for the use of GPR in site investigations, Mara Nord project report, 2011.
- [4] Guidelines for pavement structural surveys, European GPR Association report No. GS1601, 2016.
- [5] Methodologies for the Use of Ground-Penetrating Radar in Road Condition Surveys, BRRC publication ME 91/16, <http://www.brcc.be/en/item/me9116>.
- [6] ASTM D6432-11: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, 2011.
- [7] ASTM D4748-10 (2015): Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar, 2015.
- [8] Report 4A Ground Penetrating Radar - Introduction to GPR, and positioning of GPR data, Trafikverket, 2017.

### 4.3. DEFLECTÓMETRO LIGERO

#### 4.3.3. Definición

El Deflectómetro de Impacto (FWD) y el Deflectómetro Ligero (LWD) tienen el mismo principio de funcionamiento. La caída de un peso aplica una fuerza sobre un plato de carga y se mide la deflexión resultante. El LWD mide la deflexión utilizando un sensor central y, opcionalmente, 2 ó 3 sensores de deflexión más a distintas distancias radiales desde el centro de la placa. Una ventaja del LWD frente al FWD para su uso en carreteras granulares de bajo tráfico (LVGR) es su significativo menor

coste de compra y operación. La inversión inicial en la compra de un FWD, así como los altos costes de operación y mantenimiento limitan su uso y disponibilidad; incluso su mayor tamaño puede limitar su utilización para ensayar los LVGR con mayores dificultades de acceso. El Deflectómetro Ligero (LWD) permite también realizar ensayos en lugares de difícil acceso para el Deflectómetro de Impacto (FWD) (por ejemplo, durante los trabajos en las obras de construcción de carreteras).



Figura 4.3-1 – Ensayos de rutina con LWD en el Reino Unido (fuente: AECOM) (izquierda), Equipo lwd de “Inspector Englo” (fuente: Englo) (derecha)

#### 4.3.4. Método de medición

El LWD es un dispositivo portátil que se utiliza para realizar una prueba dinámica de carga con placa y evaluar rápidamente la rigidez superficial in situ de la estructura compuesta del LVGR utilizando únicamente el sensor de deflexión central. Los LWD son especialmente adecuados para la evaluación de capas estructurales compactadas y capas de la explanada, tanto antes como después de la aplicación de la capa de rodadura del firme.

El uso de ensayos con LWD en el Reino Unido ha estado motivado por la necesidad de valorar el comportamiento relacionado con las especificaciones de la ejecución del firme, en concreto para medir la rigidez de las capas granulares y las explanadas (que en el Reino Unido generalmente forman la "base" de la estructura de pavimento) empleadas en proyecto. La introducción de la rigidez es crítica en los procedimientos de cálculo empleados en el diseño de firmes.

La inclusión relativamente reciente de sensores radiales en los ensayos con LWD ha sido el resultado de querer aplicar el conocido método de ensayo FWD para el cálculo inverso de la rigidez de la capa granular y de la explanada a partir del cuenco de deflexiones medido. Sin embargo, en estos momentos, existe muy poca investigación en la literatura que analice la aplicabilidad del cálculo inverso de la rigidez a partir de ensayos con el LWD utilizando sensores radiales de deflexión.

En este informe no se considera que su uso sea de mucha importancia para los ensayos rutinarios que se efectúan en las carreteras granulares de bajo tráfico (LVGR).

El equipo LWD permite una altura de caída variable e incorpora un sensor de medida de la carga (célula de carga) y un sensor de velocidad (también conocido como "geófono") que descansa sobre el suelo a través de un pequeño orificio en el centro del plato de carga para medir la vibración.

Aunque, como ya se ha indicado anteriormente, no es necesario para los ensayos de rutina el LWD permite obtener también hasta tres valores de deflexión a una determinada distancia radial desde el centro del plato de carga. Las deflexiones medidas definen un perfil del cuenco de deflexión y permiten el cálculo inverso de la rigidez de las capas del firme. [1]

Hay varios tipos de Deflectómetros Ligeros (LWD) disponibles, y se han desarrollado también varios prototipos. El Dynatest LWD y el Grontmij Carl Bro PRIMA 100 LWD son dos ejemplos de equipos que cumplen con las normas más estrictas del Reino Unido (IAN73/06 Revisión 1, 2009) y de los Estados Unidos (ASTM E2583-07, 2015).

El LWD consta de tres partes principales: una base con una placa de carga, una célula de carga y un transductor de velocidad; un peso de caída deslizante; y un bastidor superior que consta de una barra guía de peso, un mecanismo de bloqueo y liberación, y amortiguadores de goma. La **Figura 4.3-2** incluye una representación esquemática del LWD.

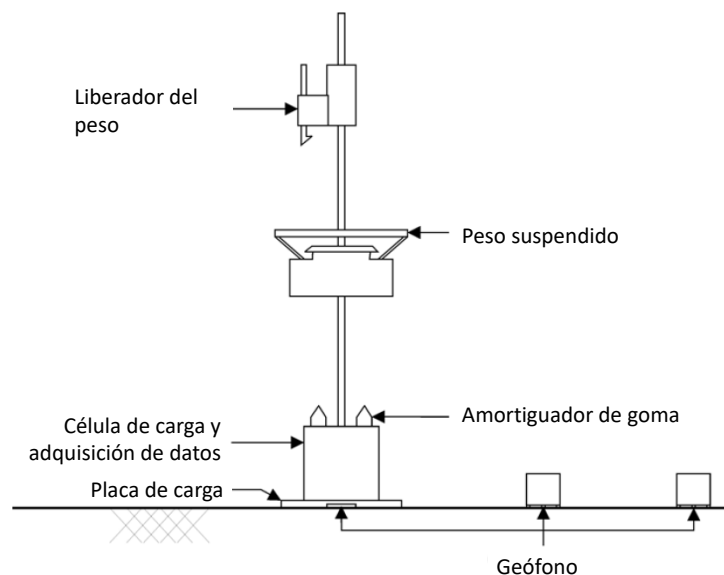


Figura 4.3-2 – Deflectómetro ligero (LWD)

Cuando el peso de caída se libera deslizándose por la barra guía y golpeando los amortiguadores de goma, a través de la placa de carga se transfiere al terreno un pulso de carga de 15 a 20 ms de duración. Se pueden conectar también 2 ó 3 transductores de velocidad adicionales (geófonos) al LWD, permitiendo la medición de un cuenco deflexión y determinar así las propiedades de la capa a profundidades crecientes. Variando la masa del peso de caída, el radio del plato de carga (50 mm a 150 mm), la altura de caída y el número de amortiguadores de goma, el operador puede controlar tanto la magnitud de la carga (normalmente de 70 a 100 kPa; y capaz de alcanzar los 150 kPa utilizando 2 pesos de caída adicionales de 5 kg) como la duración del pulso inducido por la carga.

#### 4.3.5. Indicador

El cálculo de la rigidez superficial se basa en la teoría elástica de Boussinesq.

El conjunto del LVGR o la rigidez de la superficie del cimientado del firme,  $E_0$ , se calcula en cada punto ensayado utilizando la siguiente fórmula, normalmente preestablecida en el software del fabricante:



$$E_0 = f \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot \frac{a}{d_0}$$

donde:

- $E_0$  = rigidez superficial (MPa)
- $f$  = factor de rigidez de la placa (2 es un valor estándar para una placa flexible, teóricamente  $f = \pi/2$ )
- $\nu$  = coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es una propiedad fundamental del material que describe la relación existente entre la deformación horizontal y vertical durante la compresión. Por defecto, se recomienda un coeficiente de Poisson de 0,35. Este valor es, en general, representativo para materiales no ligados (materiales granulares) y para materiales ligados con conglomerantes hidráulicos (HBMs) antes de cualquier aumento de resistencia/rigidez por curado. El coeficiente de Poisson para los HBM está en el entorno de 0,20.

- $\sigma_0$  = tensión máxima de contacto (MPa)
- $a$  = radio de la placa (mm)
- $d_0$  = deflexión máxima (mm)

#### 4.3.6. Calidad de los datos

La cuidadosa recopilación y análisis de los datos del LWD es esencial para determinar con precisión la rigidez de la superficie del firme. Se ha sugerido que la variabilidad recogida en la literatura sobre la medida de la rigidez del pavimento con el LWD podría deberse, en parte, por factores como:

##### (1) La deflexión pico registrada

El operador del LWD debe llevar a cabo una revisión cuidadosa del historial de carga y del tiempo de deformación. La deflexión pico registrada ( $d_1$ ), que se utiliza para calcular la rigidez LWD, contiene tanto las deformaciones recuperables como las permanentes y puede producirse desfasada con la carga/tensión pico aplicada.

##### (2) Número inadecuado de cargas de asiento aplicadas

Es posible que en determinados suelos sea necesario modificar la habitual serie de tres caídas de la carga. Se ha sugerido que la variación entre tres valores consecutivos de rigidez medidos en el mismo lugar no debería superar el 10%; de lo contrario podrían ser necesarias caídas adicionales. En todo caso, para una sola ubicación, el número de 'golpes' debe limitarse a un máximo de 10.

##### (3) Contacto insuficiente entre la placa de carga y la superficie de ensayo

Debe establecerse y seguirse una estricta metodología para el asentamiento del dispositivo. Las soluciones sugeridas incluyen reposicionar el ensayo sobre una superficie uniforme o, en menor medida, utilizar un lecho de arena (aunque esto ralentizará significativamente la velocidad a la que se pueden realizar los ensayos, sin embargo, los trabajos en laboratorio muestran que la arena puede mejorar el contacto de la placa del LWD con el material subyacente), alternativamente retirar hasta 100 mm de material compactado antes de los ensayos; y limitar los ensayos a firmes con una pendiente inferior al 5 %.

#### 4.3.7. Bibliografía

- [1] M. Shabbir Hossain, Ph.D., and Alex K. Apeageyi, Ph.D. "Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In Situ Determination of Pavement Layer Moduli", Virginia Transportation Research Council, Marzo 2010.

## 5. TECNOLOGÍAS EMBARCADAS

### 5.1. INTRODUCCIÓN

El informe de 2015 resumía el estado de la técnica en lo que respecta a la recopilación de datos sobre el estado de las carreteras y la interacción vehículo/carretera, ofreciendo una visión general de las prácticas actuales (en ese momento) y las tecnologías mundiales.

En los últimos años hemos visto nuevas tecnologías basadas en sensores instalados en objetos cotidianos como los coches y los teléfonos inteligentes (smartphones). Estos pueden proporcionar "datos flotantes" de vehículos o "datos celulares flotantes" conocidos como "Floating Car Data"(FCD) en inglés, adecuados para el seguimiento de la carretera tanto por parte del gestor como del usuario de la misma. A continuación se presentan métodos innovadores de recopilación de datos FCD. En la bibliografía puede encontrarse información más detallada sobre cada uno de ellos.

#### 5.1.3. TRIMM (Seguimiento y Gestión de la Infraestructura Vial del Mañana)

"El objetivo de este trabajo es mejorar la capacidad de monitorizar la funcionalidad de las carreteras mediante la realización de mediciones en tiempo real a bajo coste de la calidad de la conducción con vehículos de ensayo y proporcionar un indicador clave de comportamiento (KPI) para la gestión de activos de alto nivel, es decir, para la toma de decisiones estratégicas, el apoyo a la planificación de una política global, pero no los detalles técnicos necesarios para la preparación de una licitación para trabajos específicos de carretera en un tramo de específico de esta". [1] [2]

#### 5.1.4. SENSOVO (Sensores en vehículos)

"Tanto los usuarios de la carretera como los gestores de la misma podrían beneficiarse enormemente de la recopilación automatizada y continua de información sobre la existencia de deterioros superficiales (baches, grietas, hundimientos, etc.) por parte de una flota de vehículos equipados con sensores de bajo coste. Los usuarios de las carreteras podrían disponer de información inmediata sobre el estado de las carreteras, mientras que los gestores de las carreteras podrían obtener permanentemente información durante todo el año sobre el comportamiento general de la red de carreteras, además de los datos que obtienen de las inspecciones anuales que se realizan con dispositivos especializados de auscultación. El objetivo del proyecto era investigar las posibilidades de detección de deterioros en la superficie de la carretera utilizando datos recogidos por una flota de vehículos en servicio".

"El proyecto SENSOVO, junto con otros proyectos recientes de investigación en todo el mundo, ofrece una prueba a nivel de prototipo para flotas de ensayo para obtener los deterioros superficiales de las carreteras". [3] [4]

#### 5.1.5. MIRANDA (Sensores en Vehículos)

MIRANDA es un sistema totalmente automatizado dedicado a los gestores de carreteras para el seguimiento, en "tiempo real" y de forma continua, de la calidad de la circulación en sus redes (especialmente en las carreteras secundarias). El sistema es capaz de medir irregularidades longitudinales cuyas longitudes de onda oscilan aproximadamente entre 3 m y 45 m. MIRANDA se basa en el uso de vehículos de ensayo equipados con teléfonos inteligentes para la recogida de datos. Los sensores del teléfono inteligente proporcionan información sobre la dinámica del vehículo y su posición. Esta información se registra continuamente en el tiempo y en el espacio y se convierte en un registro del perfil de la carretera con los correspondientes indicadores (indicadores franceses NBO e IRI). Éstos se introducen automáticamente en una base de datos desde la que el gestor de carreteras puede realizar diferentes consultas (clasificación, visualización con un GIS, etc.). MIRANDA es capaz de gestionar un gran número de fuentes de medición para proponer una evaluación rápida y fiable de toda una red. [5]

#### 5.1.6. MOBI-ROMA (Métodos móviles de observación para la evaluación del mantenimiento de carreteras)

MOBI-ROMA desarrolla y evalúa los beneficios de las nuevas técnicas de posicionamiento por satélite y los conceptos operativos para la evaluación de las necesidades de gestión de carreteras utilizando datos flotantes de vehículos (FCD). El concepto es combinar y procesar los datos disponibles de estaciones fijas de medición en campo y datos flotantes de automóviles. La combinación de diferentes fuentes de datos ofrece una nueva oportunidad para un control y una detección eficaces de las variaciones en las condiciones de los firmes y de las carreteras. Entre los parámetros viales que se pueden estimar con el método MOBI-ROMA se incluyen:

- calidad del estado de la carretera,
- resistencia del firme,
- necesidad de mantenimiento invernal.

#### 5.1.7. INTRO (Carreteras inteligentes)

"El proyecto Intelligent Roads (INTRO) tiene como objetivo abordar los problemas actuales de seguridad y capacidad vial en la Unión Europea (UE) mediante el uso de tecnologías de detección, bases de datos locales y tecnologías de redes en tiempo real. INTRO está financiado por la UE a través del 6º Programa Marco de la Comisión Europea (Dirección General de Investigación). La Agencia de Carreteras del Reino Unido, cuyo vehículo de inspección, HARRIS1, se ha utilizado en el trabajo para proporcionar datos de referencia, también ha proporcionado financiación adicional. El proyecto INTRO se ha dividido en seis paquetes de trabajo. El Paquete de Trabajo 3 (WP3), "Estado de los firmes a través de firmes inteligentes y de vehículos inteligentes", tiene como objetivo mejorar la gestión del mantenimiento de la red de carreteras a través de métodos inteligentes capaces de predecir el proceso de deterioro y el estado real de forma rutinaria sin producir interferencias y hacer que esta información sea accesible a un bajo coste a través de tecnologías innovadoras. El Paquete de Trabajo 3 se divide a su vez en tres Tareas. La tarea 3.1 "Firmes Inteligentes" se refiere a las mediciones in situ del estado del firme." [6]

#### 5.1.8. CVI-UTC (Vehículo conectado)

"El objetivo de este proyecto era desarrollar prototipos y llevar a cabo una prueba de campo de las aplicaciones a nivel de sistema, de un método de medición del estado del firme en un vehículo conectado. Esto permitió al equipo de investigación: (1) investigar diferentes enfoques de un sistema de medición de firmes en vehículos conectados; y (2) determinar los procedimientos óptimos para registrar, procesar, agregar y almacenar los datos para apoyar las decisiones de ingeniería y gestión. Cuando se tuvieron en cuenta los parámetros que afectan a la regularidad el estudio encontró que las medidas de regularidad obtenidas de los vehículos de ensayo eran comparables a las medidas de regularidad obtenidas del perfil". [7]

#### 5.1.9. SRoM (Seguimiento de Carreteras con teléfonos inteligentes)

"La creciente abundancia de dispositivos inteligentes (teléfonos inteligentes, tabletas, etc.) está permitiendo un nivel de precisión y difusión sin precedentes para las aplicaciones de detección. La aplicación denominada Monitorización de Carreteras basada en "Smartphone" (SRoM) presenta "un marco de desarrollo tanto para plataformas Android como iOS, para permitir la detección más detallada y precisa y el seguimiento de las condiciones de las carreteras". Emplea "enfoques de detección de multitudes que se ajustan con precisión a la analítica posterior de datos, para potenciar tanto los esquemas de detección activa como pasiva... SRoM ha sido probada en escenarios reales...Las implementaciones actuales están siendo comunicadas con el Ministerio de Transporte de Canadá para ser probadas en sus flotas". [8]

#### 5.1.10. TotalPave®

"Recopile datos sobre el estado de las carreteras utilizando su smartphone con TotalPave® en lugar de los costosos equipos tradicionales. Introduzca de forma sencilla los deterioros en nuestra calculadora del Índice del Estado del Firme (PCI) y obtendrá sus valores al instante. Utilice nuestra aplicación móvil del Índice de Regularidad Internacional (IRI) para recoger automáticamente la regularidad mientras conduce con el dispositivo montado en el parabrisas. Toda la información recolectada en el campo es enviada automáticamente a la nube donde es seleccionada y preparada para ser analizada en su portal web personal TotalPave. Ya sea que necesite evaluar el estado de la red en su totalidad o para comprobar un problema específico en una sola vía, el análisis es fácil con TotalPave®". [9]

#### 5.1.11. RoadBounce®

RoadBounce detecta los tramos irregulares de la carretera utilizando las vibraciones de un teléfono inteligente, "*mientras conduce su vehículo*".

- *detecte baches en las rutas más transitadas y publique sus registros en redes sociales*
- *¿estás de paso por un lugar remoto? Haz que tus amigos sepan cómo está la carretera*
- *compare la calidad de conducción de diferentes coches en la misma carretera*
- *conozca el rendimiento de sus neumáticos a lo largo de su larga duración*
- *conozca la calidad de conducción a diferentes velocidades"*

Identifique baches y parcheos irregulares de la carretera con sólo conducir un vehículo en una carretera determinada. Cree una base de datos IRI/regularidad para sus carreteras en un par de días". [10]

#### 5.1.12. RoadLabPro®

"Road Lab Pro está diseñado como una herramienta de recopilación de datos para ingenieros del Banco Mundial en colaboración con Beldor Center, Softteco y Progress Analytics LLC. Con acelerómetros en sus teléfonos inteligentes, esta aplicación evalúa el estado de las carreteras, traza un mapa de las redes de carreteras, detecta los principales baches e informa sobre los peligros de la seguridad vial. Incluso puede subir una foto de baches, puntos negros, accidentes de tráfico, etc. con una simple etiqueta. La aplicación funciona en todos los dispositivos Android, como teléfonos inteligentes o tabletas. No se requiere ningún plan de datos para ejecutar esta aplicación. Todos los datos recopilados pueden enviarse por correo electrónico o cargarse en su propia cuenta de Dropbox cuando disponga de Wi-Fi. Para utilizar la aplicación, el dispositivo móvil debe colocarse en una superficie estable, preferiblemente en posición vertical y bien sujeto al parabrisas del vehículo". [11]

#### 5.1.13. RoadRoid

"Roadroid es un sistema para monitorizar el estado de las carreteras mediante el uso de teléfonos inteligentes. Consiste en:

- *una aplicación que capta las vibraciones de la carretera con el acelerómetro integrado en el teléfono inteligente y el GPS para posicionarlo.*
- un servicio de Internet para monitorizar los datos sobre el estado de las carreteras y transferirlos a los sistemas de gestión de conservación de carreteras.

La aplicación analiza las vibraciones de la carretera 100 veces por segundo (a 90 km/h es una señal cada 25 cm). A partir de estas 100 muestras, se calcula un valor del estado de la carretera y se guarda con coordenadas GPS. Existen fórmulas complejas detrás del análisis de la señal y el resultado se expresa en un estándar global: el Índice de Regularidad Internacional (IRI). Así, cada segundo se guarda un valor de IRI con una coordenada X, Y y Z del GPS.

Una vez que los datos han sido transferidos a la nube, pueden ser monitorizados en un mapa. A los datos se les asignan 4 colores dependiendo del estado de la carretera. Verde para Bueno, Amarillo para Satisfactorio, Rojo para Insatisfactorio y Negro para Deficiente. Los datos también se agregan en tramos de 100 m y se pueden descargar fácilmente para crear análisis y gráficos en Excel". [12, 13]

## 5.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

### 5.2.3. Vehículos y CAN-bus

En las últimas décadas, los automóviles se han equipado con sistemas de seguridad activa para ayudar a evitar accidentes. Estos incluyen sistemas de frenado, sistemas de control de tracción y sistemas electrónicos de control de estabilidad. Al interpretar las señales de varios sensores, estos sistemas ayudan al conductor a mejorar el control del vehículo. Estos sistemas son procesados por computación en tiempo real, con un bus de transferencia de datos de alta velocidad. En 1983 Robert BOSCH GmbH desarrolló el sistema de comunicación por ordenador (bus) Controller Area Network (CAN) que transfiere datos entre los componentes del interior del vehículo. En 1993, la Organización Internacional de Normalización (ISO) publicó la norma ISO 11898 del CAN. Hoy en día, la mayoría de los coches vendidos tienen uno o varios buses CAN.

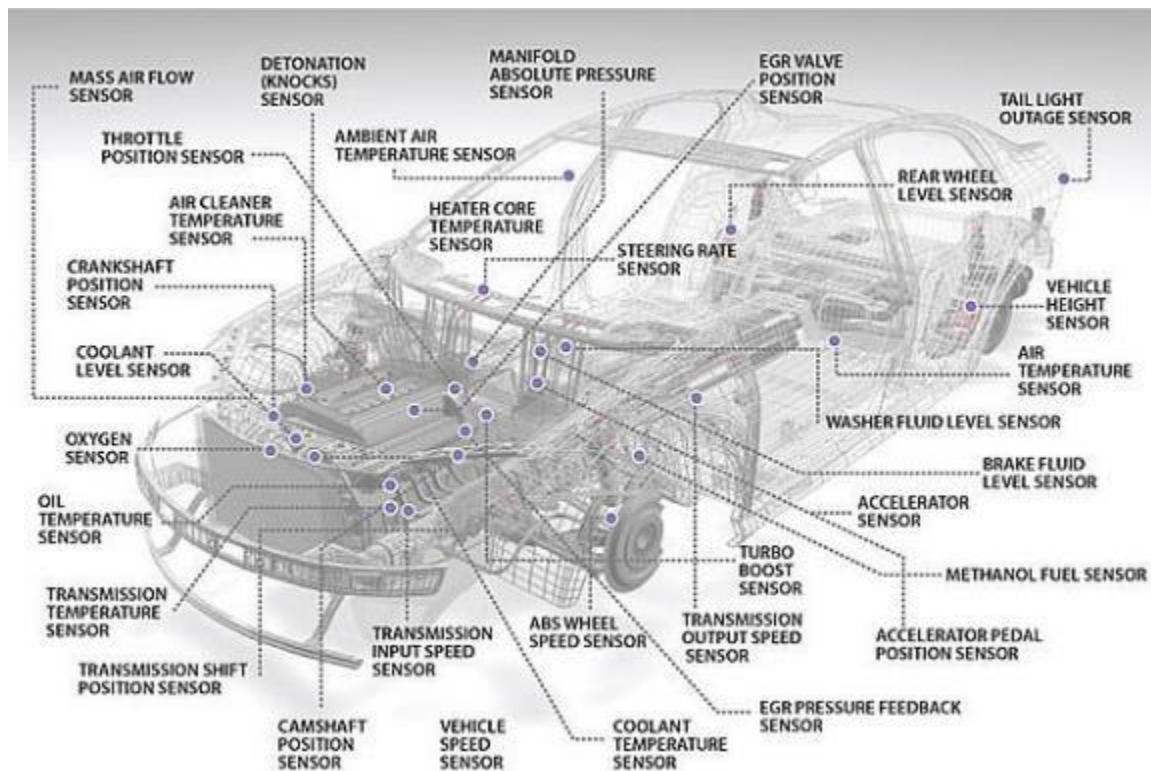


Figura 5-1 – Sensores (can-cia.org)

El uso de los datos de los sensores, así como la incorporación de nuevos sensores, es bastante fácil. Los datos del bus-CAN pueden ser recogidos mediante un registrador-CAN, procesados por un ordenador y enviados a una base de datos en un servidor central. Obviamente, sin estos dispositivos, la recopilación de datos no sería posible en un vehículo común.

### 5.2.4. Teléfonos inteligentes

Un teléfono inteligente (smartphone) es un teléfono móvil de bolsillo con capacidades de computación y conexión de red. Está equipado con pantalla táctil en color, cámara digital, micrófono, sistema de navegación por satélite, almacenamiento interno (hasta cientos de Gigabytes) y sensores como magnetómetro, sensor de proximidad, barómetro, giroscopio,

acelerómetro y sensor de huellas dactilares. Se puede considerar como un ordenador personal de mano.

Los teléfonos inteligentes utilizan un sistema operativo móvil y pueden procesar una variedad de componentes de software. Sin embargo, la estandarización está lejos de ser la regla. Por ejemplo, hay muchos sistemas operativos diferentes: Android®, iPhone®, Symbian®, Tizen®, Sailfish®, Ubuntu Touch®, PureOS®, Blackberry®, etc. Además, la calidad y el precio, son muy diferentes de un teléfono inteligente a otro. Por lo tanto, se deben tener en cuenta la precisión y fiabilidad de los valores de medición.

#### 5.2.5. Recopilación de datos

Tanto para teléfono inteligente como para CAN-bus, los parámetros físicos fácilmente medibles son la hora (fecha, hora, duración), la posición geográfica global, las velocidades lineal y angular en tres ejes, la aceleración lineal y angular en tres ejes, el sonido, la temperatura, la luminosidad, las condiciones meteorológicas y las imágenes (fotos y películas). Intuitivamente, entendemos que la recopilación de datos sobre el comportamiento de los vehículos y el entorno circundante es obvia. Téngase en cuenta que utilizando un teléfono inteligente podemos recopilar datos para otros modos de transporte como la bicicleta, el transporte público, peatonal, etc.

El conductor, o el usuario del teléfono inteligente, podría considerarse como un sensor. Por lo tanto, es posible recopilar información sobre eventos complejos como accidentes, períodos de nieve, deformaciones en la carretera, baches y, por supuesto, la opinión personal.

Cuando se diseñan teléfonos inteligentes y automóviles, los ingenieros no han logrado gestionar el control de calidad de los sensores embarcados. Posiblemente, éstos se instalan pensando en el mantenimiento, por considerar sólo el método de comprobación "funciona" o "no funciona". Por lo tanto, los procedimientos de calibración son muy difíciles.

#### 5.2.6. Colaboración abierta versus vehículo de ensayo

El objetivo es elegir quién realiza el seguimiento de las carreteras, dónde y cómo se recogen los datos y quién analiza e informa sobre el estado de la red de carreteras. Los datos podrían recopilarse a través de colaboración abierta, o crowdsourcing como se conoce en inglés, (es decir, obteniendo información o aportando información para una tarea o proyecto mediante la contratación de los servicios de un gran número de personas) o con una flota dedicada de vehículos.

Los teléfonos inteligentes pueden considerarse como un ordenador personal autónomo de mano. El desarrollo del software se puede hacer de forma fácil y rápida. La aplicación maneja los datos en bruto, posiblemente hace un proceso preliminar y proporciona el almacenamiento. Los teléfonos inteligentes están equipados con capacidades de conexión en red. La transferencia de datos a una base de datos central puede realizarse a través de una ranura USB, Servicio General de Radio por Paquetes (GPRS), Wi-Fi o Bluetooth. Las aplicaciones pueden estar disponibles a través de un servicio de distribución digital como Google Play. Por lo tanto, la colaboración abierta es posible con la participación de los usuarios de la carretera.

El usuario descarga y configura la aplicación, monta el smartphone firmemente en un soporte y recorre la red de carreteras como de costumbre. Actualmente, los procedimientos de calibración no son posibles. La falta de precisión y fiabilidad se ve contrarrestada por la repetición de las mediciones y la agregación de los datos recogidos por otros usuarios. En relación con esto, las aplicaciones de los teléfonos inteligentes utilizan en su mayoría su propio índice de calidad. Los datos se almacenan en formato propietario, y hay poca información sobre la fórmula matemática que proporciona el índice de calidad. Para un mayor desarrollo sostenible, el intercambio de datos debe ser en un formato abierto.

La mayor ventaja de la colaboración abierta es la alta frecuencia de la monitorización de las carreteras. También es posible obtener datos sobre carreteras de bajo tráfico. Por el contrario, la

participación del público en general hace que el control de las carreteras sea menos técnico y más político.

Ni la recopilación ni el almacenamiento de datos del bus-CAN son soportados de serie. Es necesario conectar un registrador CAN, o un dispositivo similar, en el conector CAN DB-9 estandarizado (**Figura 5-2**). Además, muy pocos vehículos están conectados a la red. Por lo tanto, la colaboración abierta con la tecnología CAN-bus es más complicada que con los teléfonos inteligentes. No obstante, los datos pueden recogerse mediante transferencias periódicas o en tiempo real.



*Figura 5-2 – algunos ejemplos de conectores BUS-CAN*

La tecnología bus-CAN se utiliza casi exclusivamente en vehículos de ensayo, pero esto no significa que se dediquen exclusivamente a la monitorización de las carreteras. La **Figura 5-3** ilustra algunos proveedores potenciales de vehículos de ensayo.



*Vehículos de mensajería (i) Camiones de reparto (iii) Taxis*

*Figura 5-3 – Algunos ejemplos de posibles vehículos de ensayo*

La mayor ventaja de los vehículos de ensayo es la mayor precisión y fiabilidad de los valores de medición. Pueden añadirse sensores específicos de bajo coste y puede preverse un método de calibración. Esto permite cubrir toda la red de carreteras con datos de seguimiento frecuentes y de buena calidad.

### 5.3. COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DEDICADAS ESPECÍFICAS

Uno de los mayores retos a superar es el procesamiento de los datos. Los datos enviados por cientos de vehículos de ensayo o millones de personas procedentes de la colaboración abierta deben ser procesados con herramientas del campo de la Inteligencia Artificial (IA). Además, la calidad de los datos es una gran preocupación. Los sensores no están calibrados de la misma manera que los de las tecnologías dedicadas específicamente a la auscultación. Las tecnologías de teléfonos inteligentes y CAN-bus deben compararse con los índices proporcionados por las tecnologías de auscultación.

#### 5.3.3. Regularidad longitudinal

En 2002, el **proyecto RoadRoid®** comenzó con la medición de un índice de regularidad con un vehículo de ensayo equipado con un acelerómetro de alta resolución en la rueda delantera. Posteriormente, en 2010, se decidió utilizar un teléfono inteligente y un vehículo de ensayo, para lograr el mismo resultado. La aplicación RoadRoid produce dos índices específicos de calidad de regularidad:

- IRI estimado (eIRI) para velocidades entre 20 y 100 km/h,
- IRI calculado (cIRI) para una velocidad constante entre 60 y 90 km/h.

Como conclusión, el proyecto puso de manifiesto que las diferencias entre los modelos de automóviles, especialmente a bajas velocidades (40 a 80 km/h), son limitadas. Los ensayos proporcionaron un modelo para calcular la influencia de la velocidad de la señal para tres tipos o clases diferentes de vehículos.

La medición de carreteras con teléfonos inteligentes puede proporcionar una forma eficiente, escalable y rentable para que las organizaciones de carretera proporcionen datos sobre su estado. El cIRI y el eIRI se correlacionan hasta un 81% con los sistemas de medición de tecnologías implantadas.

Al emitir alertas sobre el estado de las carreteras, mediante normas para los ITS, la información podría proporcionar nuevos tipos de información dinámica y valiosa para los sistemas de navegación de los automóviles y para las guías de ruta digitales para el tráfico de vehículos especiales, etc.

Un proyecto de investigación australiano tiene como objetivo comparar el comportamiento de la aplicación RoadRoid® con el de un perfilómetro láser inercial y un perfilómetro basado en acelerómetros [14]:

"Las mediciones de regularidad eIRI y cIRI realizadas con teléfono inteligente eran, por lo general, repetibles. Sin embargo, en comparación con los datos de referencia, las correlaciones fueron bajas debido a que el teléfono inteligente no pudo medir con precisión el IRI en las secciones de ensayo. En algunos casos, esto no fue inesperado, ya que se tomaron los datos fuera del rango de velocidad recomendado para cIRI o, en una superficie sin sellar, para eIRI. Sin embargo, pudo comprobarse también que las mediciones dependían en gran medida de la velocidad y dieron resultados diferentes para cada velocidad en todos los tramos de ensayo. Aunque el teléfono inteligente es portátil y muy fácil de usar, sus mediciones también dependen de la respuesta del vehículo portador a la superficie del firme. Por lo tanto, es probable que un cambio de vehículo suponga cambios en las mediciones realizadas por el dispositivo. En términos de niveles de calidad de la información descritos por el Banco Mundial (Bennett et al. 2007), aunque la aplicación para teléfonos inteligentes es un sistema automatizado, su falta de precisión y dependencia de la velocidad implica que es difícil recomendarla para la toma de datos con una calidad superior a la IQL-4 [nivel de red] en comparación con los del 2LP, que puede tomar datos IQL-1 [nivel de proyecto] y los datos del perfilómetro con nivel IQL-3 o superior".

El objetivo del **proyecto CVI-UTC** era desarrollar prototipos y realizar una prueba de campo de las aplicaciones a nivel de hardware de un sistema de medición del estado de los firmes en un vehículo conectado. En general, las mediciones de regularidad obtenidas por el vehículo de ensayo instrumentado son comparables a las medidas de regularidad obtenidas con un perfilómetro inercial, cuando se tienen en cuenta los parámetros apropiados que afectan a la regularidad. Los resultados de las simulaciones a nivel de la red pusieron de manifiesto que las mediciones de la aceleración vertical del vehículo de ensayo con un teléfono móvil tienen el potencial de ser utilizadas para la detección a nivel de la red de secciones del firme en mal estado.

En el **proyecto TRIMM** se puso a punto con éxito una máquina vectorial de apoyo con datos bus-CAN para estimar el valor del indicador WLP. [2]

#### 5.3.4. Resistencia al deslizamiento

El objetivo del **proyecto INTRO**, Tarea 2.2, ha sido vincular la resistencia al deslizamiento del pavimento con la distancia de frenado del vehículo. Un modelo de distancia de frenado es una medida más intuitiva del coeficiente de resistencia al deslizamiento. Se ha demostrado que la deceleración de la velocidad durante un frenado con la rueda bloqueada se correlaciona bien con el coeficiente de resistencia al deslizamiento. La solución más adecuada es estudiar directamente la curva de deceleración, expresando la variación temporal de la deceleración durante la frenada.



### 5.3.5. Defectos superficiales

El **proyecto SENSOVO** tenía como objetivo probar la toma masiva y automatizada de datos sobre una carretera con deterioros superficiales (baches, grietas, etc.) por parte de una flota de vehículos de ensayo. La recopilación de información con cámaras de Tiempo de Vuelo (ToF) y una selección de datos de bus-CAN disponibles en automóviles y camiones modernos puede indicar con bastante precisión la presencia de deterioros superficiales.

### 5.3.6. Capacidad portante

En las regiones frías, los ciclos de hielo-deshielo en primavera pueden dar lugar a una reducción de la capacidad portante en explanadas y carreteras sin asfaltar. La combinación de las condiciones climáticas con las vibraciones laterales al conducir por una curva, puede dar información sobre la capacidad portante de los caminos no pavimentados.

## 5.4. DISCUSIÓN

En la actualidad, algunas características superficiales importantes no pueden medirse con la recopilación de datos flotantes de vehículos (FCD), como las fisuras, la capacidad portante de las carreteras pavimentadas, la existencia de roderas, la resistencia a la rodadura, la macrotextura superficial y las características acústicas.

En la mayoría de los sistemas FCD, los datos se presentan en un formato propio y se dan indicadores de calidad no normalizados. Sería un error pensar que estos pueden correlacionarse fácilmente con los indicadores estándar habituales. En la actualidad, el uso de FCD puede ser una alternativa barata para algunas costosas auscultaciones de red tradicionales. Para algunos propietarios de carreteras (locales) esta podría ser una alternativa viable para obtener algunos indicadores de regularidad, coeficiente de rozamiento y deterioros superficiales. Tal vez el futuro esté en las técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a cantidades masivas de datos (no estandarizados).

Por el contrario, los sistemas FCD pueden proporcionar instantáneamente información útil, como por ejemplo: atascos de tráfico, accidentes, lugares nevados o helados y acontecimientos específicos. También es posible tener una mejor visión de las rutas más transitadas y dónde se activan más a menudo los sistemas ABS, ESP y TCS. Sobre todo, esta información puede trasladarse a los conductores para aumentar la seguridad vial.

La recopilación, el almacenamiento y el análisis de los datos pueden ser procesados por empresas privadas o administraciones de cada país. Pero, cualquiera que sea la implementación de un modelo de negocio apropiado, debe respetarse la protección de datos personales:

"En Europa la protección de las personas físicas en relación con el tratamiento de datos personales es un derecho fundamental. Los principios y normas sobre la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de sus datos personales deben respetar, independientemente de su nacionalidad o residencia, sus derechos y libertades fundamentales, en particular su derecho a la protección de los datos personales". Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016.

En la actualidad, los administradores de carreteras recopilan datos técnicos que se utilizan a distintos niveles en los procesos de toma de decisiones para la planificación y preparación de las obras viales. Por lo general, estos datos técnicos se recopilan con dispositivos de auscultación de "alta tecnología" y elevado coste. Por lo tanto, en la actualidad la cuestión estratégica es aumentar la precisión y la frecuencia de las mediciones y aumentar la cobertura de la red de carreteras, al tiempo que se reducen los costes de auscultación.

## 5.5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring and Management, Collaborative project FP7-285119, 7<sup>th</sup> Framework Programme, Theme: Advanced and cost effective road infrastructure construction, management and maintenance, Deliverable D4.4 Monitoring Road Functionality in Real-Time with Probe Vehicle Data, website: <http://trimm.fehrl.org>.
- [2] Monitoring ride Quality on roads with existing sensors in passengers cars, Philippe Nitsche et al., 2014, 26<sup>th</sup> ARRB Conference, Sydney, Australia.
- [3] Sensors on vehicles (SENSOVO), Proof-of-concept for road surface distress detection with wheel accelerations and ToF camera data collected by a fleet of ordinary vehicles, website <http://www.vim.be/projecten/sensovo>.
- [4] Sensors on Vehicles (SENSOVO), Proof-of-concept for Road Surface Distress Detection with Wheel accelerations and ToF Camera Data Collected by a Fleet of Ordinary Vehicles managing Asset Maintenance, Carl Van Geem et al., 2016, 6<sup>th</sup> TRA Conference, Warsaw, Poland.
- [5] Mesures d'Indicateurs Routiers par Appareils Nomades d'Auscultation (MIRANDA), IFSTTAR, website: <http://www.lames.iftstar.fr/linstitut/mast2/laboratoires/lames-iftstar/materiels-et-logiciels/miranda/>.
- [6] INTRO, Intelligent Roads, <http://intro.fehrl.org/>.
- [7] Connected vehicle/infrastructure university transportation center (CVI-UTC), Virginia Tech Transportation Institute, website: <https://cvi-utc.org/>.
- [8] Scalable Transportation Monitoring using the Smartphone Road Monitoring (SRoM) System, School of Computing, Queen's University, Kingston, ON, Canada, <https://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2815347.2815349>.
- [9] TotalPave, website: <http://totalpave.com/>.
- [10] RoadBounce, website: <http://www.roadbounce.com/>.
- [11] RoadLabPro, website: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.softteco.roadlabpro&hl=en>.
- [12] RoadRoid, website: <http://www.roadroid.com/>.
- [13] Roadroid: Continuous Road Condition Monitoring with Smart Phones, Lars Forslöf and Hans Jones, Roadroid AB, Department of Computer Engineering, Dalarna University, Sweden, Journal of Civil Engineering and Architecture 9 (2015) 485-496 doi: 10.17265/1934-7359/2015.04.012.
- [14] Measuring road roughness with a smartphone – horses for courses?, 27th ARRB Conference, Linking people, places and opportunities, Melbourne, Victoria 2016, Richard WIX, ARRB Group, Australia.

## 6. CASOS PRÁCTICOS

### 6.1. UTILIZACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO LIGERO A NIVEL MUNDIAL

Los siguientes casos prácticos muestran cómo puede utilizarse o cómo se ha utilizado un deflectómetro ligero de impacto (LWD).

#### 6.1.3. Sudáfrica

##### 6.1.3.1. La investigación

En las carreteras de este proyecto se llevó a cabo una investigación destructiva para [1]:

- determinar la naturaleza y calidad de los materiales in situ,
- identificar cualquier área con materiales de cimentación de calidad inferior a la norma.

La investigación abarcó los siguientes pasos:

Excavación de calicatas en las capas de firme existentes, a intervalos de 2 km, a una profundidad media de 500 mm por debajo de la superficie de la carretera y toma de muestras representativas para la realización de ensayos de laboratorio.

Ensayos de penetración dinámica (DCP) a una profundidad de 500 mm en las calicatas.

Resúmenes de los resultados de los ensayos de laboratorio y en las calicatas que muestran la naturaleza y el espesor de las capas del firme a lo largo de la ruta.

Cálculo de los percentiles 10 y 50 del CBR in situ de la explanada a partir de los ensayos de penetración dinámica (DCP) realizados en varios puntos a lo largo de cada tramo de carretera. En la **Tabla 6.1-1** se resumen, para tres secciones características, el valor del CBR in situ adoptado para cada sección de carretera, la categoría de tráfico para una vida de servicio de 10 años y el diseño del firme necesario en función del valor del percentil 10 del CBR y estado de humedad: seco.

TABLA 6.1-1 – DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS DE CALIDAD					
CARRETERA	SECCIÓN	DCP-CBR <sup>(A)</sup>		CATEGORÍA DE TRÁFICO <sup>(B)</sup>	DISEÑO DEL FIRME <sup>(C)</sup>
		PERCENTIL 50%	PERCENTIL 10%		
GRx	0,32-0,80	50	35	ES0,3	WC 100 G5 100 G7
	0,80-5,30			ES0,1	WC 100 G6 100 G7
	5,30-8,81			ES0,03	WC 175 G7

Valores de CBR en condiciones secas calculados a partir de los ensayos de penetración dinámica (DCP) . en los 300 mm superiores de la carretera granular de bajo tráfico (LVGR).

Clase de firme en función del número de ejes equivalente (ESAL) de 80 kN, por ejemplo, ES0,1 puede soportar 0,1 millones de ESAL.

Según el catálogo de dimensionamiento, WC = capa de rodadura, 100 G5 = 100 mm de material G5; G5 CBR mínimo de 45 %, G6 CBR mínimo de 25 % y G7 CBR mínimo de 15 %.

##### 6.1.3.2. Opciones de tratamiento propuestas

Sobre la base de la evaluación visual realizada que muestra la existencia de muchos lugares donde la explanada está expuesta y el espesor de grava restante es inferior a 50 mm, se propusieron los siguientes tratamientos de "Regravillado de tramos de carretera, incluida la pavimentación de tramos cortos":

- regravillado: el espesor de la grava de la capa de rodadura varía de 100 mm a un máximo de 200 mm. Se determinó una frecuencia de regravillado de 4 a 6 años;
- extensión de una capa de soporte G5/G6 de 100 mm de espesor bajo la capa de rodadura desde el km 0,32 hasta el km 5,30;
- revestimiento de lugares seleccionados para hacer frente a la erosión en curso y a las altas pérdidas de grava en secciones en pendiente;
- revestimiento, compuesto de doble sellado (9,5 mm + arena), entre los km 5,5 a 7,5 con el fin de reducir al mínimo las posibles condiciones de conducción resbaladizas e inseguras.

**6.1.3.3. Valores propuestos empleando el deflectómetro ligero (LWD)**

Según el punto iv del apartado 6.1.1.1., el deflectómetro ligero (LWD) podría emplearse para realizar ensayos rápidos (sólo unos minutos para ensayar en cada punto) y no destructivos a intervalos de 50 m, por ejemplo, con el fin de confirmar las longitudes de las tres secciones características. Además, utilizando los datos del LWD, sería posible determinar los puntos más débiles de la muestra de datos de ensayo y determinar aquellos en los que lleva a cabo un ensayo de penetración dinámica (DCP), por ejemplo, los dos puntos más débiles y el punto más fuerte.

Mientras que los ensayos LWD proporcionan información sobre la rigidez del paquete de firme, el DCP es el más adecuado para determinar el CBR de la capa de rodadura, de las capas estructurales y de la explanada; y para interpretar sus espesores en función de los cambios en la resistencia CBR de una capa a otra. Los CBR in situ, obtenidos a través de los ensayos DCP, serían especialmente importantes para ayudar a explicar las causas de los bajos resultados de rigidez del LWD, como una capa estructural delgada o una explanada de baja calidad. Estos podrían ser, a su vez, los puntos en los que ejecutar calicatas de ensayo para tener un conocimiento detallado de los materiales del firme y su estado, incluyendo su humedad y densidad.

El LWD podría utilizarse para evaluar la calidad del tratamiento seleccionado.

En la **Figura 6.1-1** se presenta un diagrama DCP idealizado que muestra cómo podría ser la resistencia CBR del nuevo diseño de pavimento ES0,3 LVGR, es decir, una capa de rodadura de 150 mm de espesor (CBR de 15 %) sobre 100 mm de G5 (CBR de 45 %), 100 mm de G7 (CBR de 15%) y una explanada seca con un CBR de 35%.

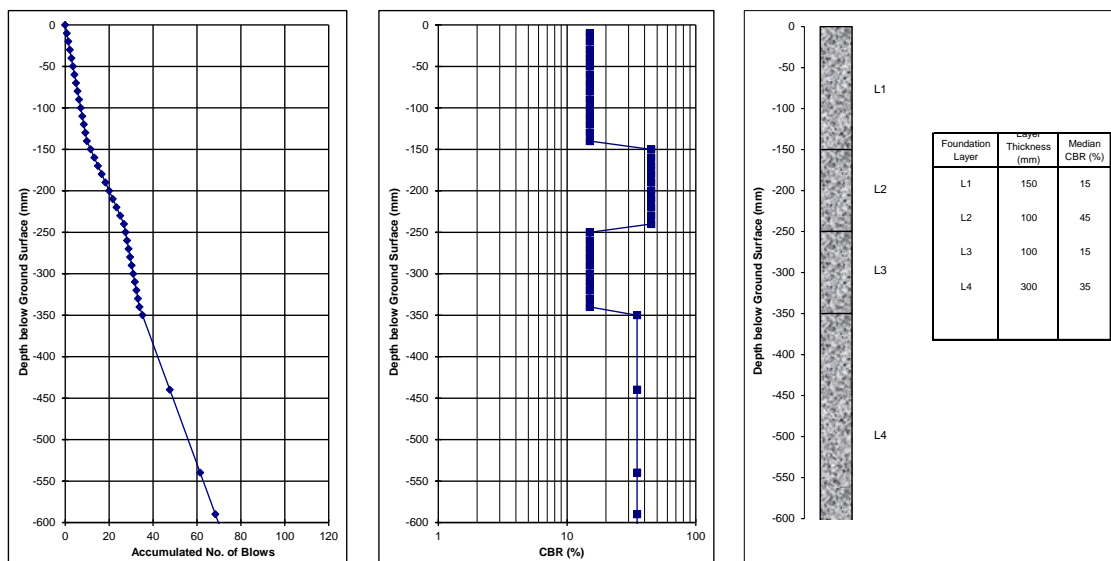


Figura 6.1-1 – Gráfico DCP idealizado

Para el mismo diseño del firme nuevo ES0,3 LVGR, por la relación directa entre el índice de penetración DCP y la rigidez de la superficie de la explanada [2] bajo él, se espera que el ensayo LWD [con la nueva capa de rodadura de 150 mm de espesor (CBR de 15% = 81 MPa), sobre un G5 de 100 mm de espesor (CBR de 45 % = 162 MPa) , sobre un G7 de 100 mm de espesor (CBR de 15% = 81 MPa) todo ello sobre los 300 mm de la explanada existente (CBR de 35 % = 139 MPa)] mida una deflexión teórica máxima (bajo la acción de una carga dinámica de 730 kg = 7,1 kN de fuerza, sobre una placa de 151 mm de diámetro)  $d_0 = 0,258$  mm. El cálculo se realiza según un modelo multicapa elástico lineal; para el cual la rigidez superficial calculada es  $E_0 = 103$  MPa; véase **la Figura 6.1-2**.

$$E_0 = 537,76 (PR)^{-0,6645} \text{ MPa} \quad [2]$$

donde:

- $E_0$  = Rigidez superficial (MPa)
- PR = Índice de penetración (mm/golpe)
- CBR = California Bearing Ratio (%)

Sin embargo si, por ejemplo, la explanada se hubiera humedecido antes de que se llevara a cabo el ensayo LWD sobre la superficie de la capa de rodadura de la estructura terminada, y el valor CBR hubiera disminuido de 35 % a 11 %, el ensayo LWD [en una nueva capa de rodadura de 150 mm de espesor (CBR de 15 % = 81 MPa) sobre una nueva G5 (CBR de 45 % = 162 MPa), a su vez sobre una nueva G7 (CBR de 15 % = 81 de MPa) sobre los 300 mm de la explanada existente en estado húmedo (CBR de 11 % = 67 MPa)]. El LWD habría medido una deflexión teórica máxima  $d_0 = 311$  mm que correspondería a una rigidez superficial calculada  $E_0 = 85$  MPa. Y el DCP podría haberse previsto para ser realizado en este punto a fin de confirmar la causa de esta reducción de la rigidez; véase **la Figura 6.1-2** (tramo 1900-2200 m) para valorar el diseño ingenieril.

Y si la carretera pasara por un corte poco profundo en el que quedase expuesta la explanada rocosa [como en el caso anterior con una explanada de 250 MPa], el ensayos LWD mediría una deflexión teórica máxima  $d_0 = 0,189$  mm para la cual la rigidez superficial calculada sería  $E_0 = 139$  MPa. Y el DCP podría realizarse en esta zona para confirmar la causa del aumento de rigidez; véase **la Figura 6.1-2** (tramo 2400-2700 m) para valorar el diseño ingenieril.

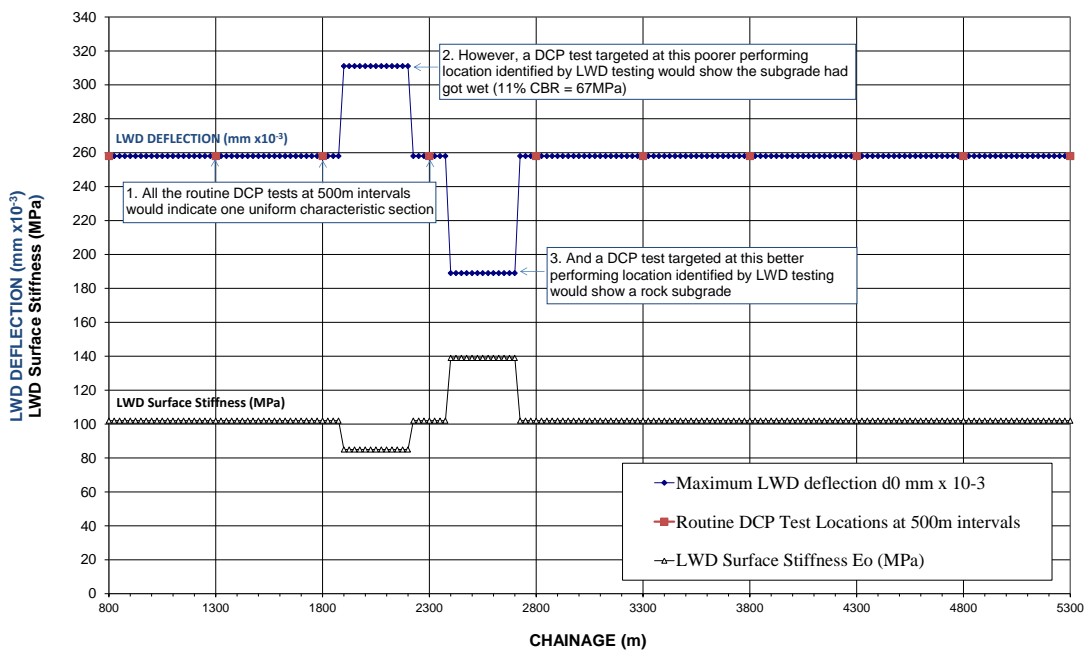


Figura 6.1-2 – Diagrama LWD idealizado

#### 6.1.4. Finlandia

El caso práctico "*Aplicabilidad de los equipos portátiles en la evaluación de la capacidad portante de las carreteras forestales en Finlandia*" [3] estudia cómo se han utilizado los ensayos LWD para informar y valorar el tratamiento óptimo del mantenimiento estructural.

Las carreteras forestales forman parte de la red finlandesa de LVGR. Están formadas por una capa de rodadura (capa superficial) y de capas estructurales (capas de base y subbase) sobre la explanada. La capa de subbase se utiliza para separar las capas superiores del firme de la explanada y está formada normalmente por grava o arena de grano grueso, que corta el ascenso capilar del agua desde la explanada hacia el firme. La capa de base está formada generalmente por grava gruesa o roca triturada. Estos materiales proporcionan a la estructura de la carretera la mayor parte de su capacidad portante. La capa superficial está compuesta por una grava triturada de alta calidad más fina o roca triturada (árido).

Los valores de rigidez medidos (MPa) se utilizan para dos propósitos diferentes:

- en primer lugar, para determinar si la carretera necesita o no ser reparada;
- en segundo lugar, para evaluar la transitabilidad diaria de la carretera durante el proceso de deshielo en primavera, momento en el que se producen los mayores problemas de capacidad portante.

El método de medición de la rigidez mediante impacto es el más utilizado. Los métodos estáticos, como el ensayo con carga de placa, son teóricamente sólidos, pero no son aplicables a los LVGR, ya que no representan la carga dinámica producida por el tráfico. El dispositivo más popular en Finlandia para carreteras forestales, aplicando el principio del método de impacto, es el deflectómetro de impacto (FWD), que representa mejor la carga de la rueda de un vehículo y, alternativamente, el deflectómetro ligero (LWD). En Finlandia el FWD se utiliza normalmente en carreteras pavimentadas de baja intensidad de tráfico y a veces también en carreteras forestales. Además del FWD y del LWD, probablemente el Ensayo de Penetración Dinámica (DCP) haya sido otro de los métodos más utilizados en caminos forestales en Finlandia durante los últimos 10-20 años. Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

Los resultados de las mediciones con LWD y FWD no son iguales, pero sí son comparables.

El DCP y el LWD son herramientas útiles para medir la capacidad portante. Los resultados indican que el LWD y el DCP pueden utilizarse en muchas circunstancias como herramientas bastante fiables para evaluar la rigidez de la estructura de la carretera en lugar del FWD y son procedimientos más flexibles, rápidos y baratos de utilizar.

Sin embargo, tanto el LWD como el DCP tienen ciertas fortalezas y debilidades que deben tenerse en cuenta al evaluar la aplicabilidad de estas herramientas. El LWD es una herramienta razonablemente fiable para medir las rigideces de la capa de rodadura de las carreteras. Por lo tanto, se puede utilizar para estimar la transitabilidad durante la época de deshielo para evitar daños en las carreteras. El DCP es más adecuado para definir las profundidades de deshielo.

Si no es necesario conocer detalles específicos de la estructura de la carretera o de la explanada, y se necesita principalmente información sobre la capa superior de la carretera, el LWD es adecuado para evaluar su transitabilidad.

#### 6.1.5. Estados Unidos

El caso práctico "*Estudio del Deflectómetro de Impacto Portátil*" [4] examina cómo se ha utilizado el ensayo LWD como herramienta para ayudar a determinar el momento en el que deben imponerse restricciones de peso durante el deshielo de primavera en carreteras LVGR y en carreteras con una rodadura ligera (menos de 125 mm de espesor de materiales asfálticos).

El estudio recomienda que durante el deshielo de primavera se impongan restricciones a la carga de los vehículos cuando la rigidez del firme descienda por debajo de un determinado porcentaje [por ejemplo, un 80 %] de sus valores totalmente recuperados, y se elimine dicha restricción cuando la rigidez se recupere por encima de estos valores.

En general, la rigidez del LWD y del tradicional FWD siguen tendencias similares en secciones ensayadas durante el periodo de evaluación, tanto con superficies pavimentadas como con superficies granulares no revestidas. Por lo tanto, el LWD y el FWD serían igualmente efectivos para la auscultación del cambio de rigidez durante el deshielo de primavera.

El estudio indica que con un diámetro de placa pequeño el peso de caída influye sólo en las partes superiores de la sección del firme y, por lo tanto, las respuestas de deflexión están dominadas por la rigidez de la capa de rodadura y la capa estructural, lo que proporciona una mayor rigidez compuesta. Para la mayoría de las aplicaciones, se debe utilizar en el ensayo el mayor peso de caída, el mayor radio de la placa y la mayor altura de caída. Los resultados del primer golpe no deben tenerse en cuenta. Se recomienda promediar los resultados de los golpes segundo a sexto para obtener resultados representativos del punto de ensayo. Los resultados de los ensayos de campo indican también que a medida que aumenta el grado de compactación, aumenta la rigidez del conjunto.

Existe una fuerte correlación entre la rigidez del conjunto determinada con LWD o con FWD. Esta correlación aumenta a medida que disminuye el espesor de las capas asfálticas.

El LWD presenta el potencial de poder realizar un seguimiento de las variaciones estacionales de rigidez en carreteras pavimentadas y no pavimentadas de baja intensidad de tráfico. La rigidez del pavimento es un parámetro clave para determinar la susceptibilidad al daño de los firmes. Los firmes en zonas con periodos estacionales de helada y deshielo sufren a menudo el debilitamiento producido por las heladas y el descongelamiento, además del deterioro producido por las cargas. Para minimizar los daños, muchas agencias de conservación de carreteras imponen restricciones de carga durante los períodos más susceptibles a que se produzcan estos daños.

El deflectómetro ligero (LWD) puede utilizarse como una herramienta para evaluar si determinadas carreteras experimentan una pérdida de resistencia durante el deshielo de primavera y, por lo tanto, justificar las restricciones de carga. En el caso de carreteras con restricciones de carga, el LWD puede utilizarse como ayuda para determinar cuándo deben imponerse y retirarse estas restricciones.

#### 6.1.6. Bibliografía

- [1] Regravelling Of District Roads Near Vanrhynsdorp - Preliminary Design Report H4779, Junio 2012.
- [2] Dang-Fong Lin 2006 relationship between the DCP penetration rate and the subgrade surface stiffness.
- [3] Applicability of portable tools in assessing the bearing capacity of forest roads [in Finland].
- [4] Portable Falling Weight Deflectometer Study, Byran C. Steinert, Dana N. Humphrey, and Maureen A. Kestler, March 11, 2005, Department of Civil and Environmental Engineering University of Maine Orono, Maine.

## 6.2. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS DE PAVIMENTACIÓN EN PORTUGAL

A continuación se describen una serie de ejemplos de la experiencia de la Administración de Carreteras portuguesa con el deflectómetro de impacto (FWD), para el control de calidad de las obras de pavimentación.

### 6.2.3. Participación Público-Privada (PPP) – uso del FWD para el control de calidad durante la gestión de la conservación

El Itinerario A5 / IP5, en el centro de Portugal, entre Boa Aldeia y Mangualde es un ejemplo del uso del FWD para el control de calidad de la capacidad portante del firme de una carretera durante la fase de explotación. Las actuaciones que se describirán son comunes a todos los tipos de carreteras PPP bajo la gestión de la Administración de Carreteras portuguesa.



*Figura 6.2-1 - A5/IP5 - Boa Aldeia / Mangualde da A25 (Viseu), 30 km de longitud*

El control de calidad, en la etapa de explotación, se basa en un manual de explotación y mantenimiento y un plan de control de calidad (PCQ - Plano de Controlo de Qualidade), que contiene los requisitos y estándares mínimos para las actuaciones de conservación. En relación al firme, el PCQ incluye una serie de parámetros que necesitan ser evaluados periódicamente para verificar el cumplimiento del valor mínimo de calidad durante el ciclo de vida de la carretera, de lo contrario es necesario tomar medidas para la rehabilitación del firme.

Para el indicador "evaluación estructural" la metodología consiste en la realización de ensayos de carga con FWD, para evaluar la capacidad portante de las capas de firme y de la explanada. Estos ensayos se realizan en la rodada derecha de cada carril, o en el carril que soporte el tráfico más pesado en las autovías de varios carriles, con una periodicidad de 4 años.

A continuación, se realiza un análisis estadístico de los datos "normalizados" de la deflexión con FWD mediante el método de sumas acumuladas y se divide el tramo de carretera en subsecciones homogéneas. Para cada subsección homogénea el cuenco de deflexión, con la correspondencia más



cercana a un cuenco de percentil 85, se somete a un proceso de cálculo inverso para determinar el módulo de rigidez de las diferentes capas del firme y de la explanada. Tras este proceso, se modeliza la estructura del firme, se determinan las tensiones y deformaciones críticas y se calcula su vida residual teniendo en cuenta los datos reales de tráfico desde el inicio de la fase de explotación o desde los últimos trabajos de rehabilitación llevados a cabo.

La rehabilitación del firme debe planificarse cuando su vida residual para el tráfico real, es decir, los datos de tráfico registrados por los sistemas de aforo, sea inferior al 40 % de la capacidad portante de diseño o de la capacidad portante calculada inmediatamente después de la construcción del firme.

Los resultados obtenidos permiten al ingeniero:

- comparar los módulos de rigidez obtenidos del firme en servicio con los módulos de rigidez calculados inmediatamente después de su construcción;
- evaluar si se ha superado la vida residual del 40 %, teniendo en cuenta las condiciones reales del tráfico durante el período considerado;
- evaluar la necesidad de una reparación mayor para recuperar la capacidad portante del firme;
- iniciar un ciclo de proyectos de rehabilitación del firme.

#### **6.2.3.1. Uso del FWD para el control de calidad durante las operaciones de extendido de mezclas asfálticas**

El tramo de la IC1 entre Viana do Castelo y Mirandela, en el norte de Portugal, es un ejemplo del uso del FWD para el control de calidad de las capas de firme durante la fase de construcción de la carretera, en particular para evaluar los módulos de rigidez. Este tipo de actuación se utiliza predominantemente en aquellas obras en las que se utilizan nuevos materiales/tecnologías con el objetivo de evaluar su eficacia.



*Figura 6.2-2 - IC1 – Nudo de Viana/nudo de Meadela e IP9 (Viana do Castelo), 8 KM de longitud*

Los trabajos de extendido de mezclas asfálticas en la IC1 – Nudo de Viana a Nudo de Meadela e IP9 comenzaron en el año 2000. En estos trabajos se utilizaron mezclas de alto módulo (HMAM) y mezclas con caucho (RA *rubber asphalt*), que en aquel momento fueron innovadoras en Portugal.

Durante los trabajos en obra el Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) realizó pruebas de carga con deflectómetro de impacto (FWD) para evaluar los módulos de rigidez de las capas ejecutadas y, en particular, de la capa de alto módulo, ya que se detectaron importantes diferencias entre las características de los materiales consideradas en proyecto y las que se obtuvieron en obra.

Los ensayos con deflectómetro de impacto FWD se realizaron en muchos tramos de la carretera, que fueron seleccionados por el equipo de control encargado de la construcción, a lo largo de la rodada derecha de cada uno de los carriles. La distancia entre puntos de ensayo fue de 50 m en la primera pasada y de 100 m en la segunda pasada. En cada punto se aplicaron 3 golpes con un nivel de carga de 50 kN. Se empleó un diámetro de placa de carga de 0,30 m y 7 geófonos (para medir las deflexiones en superficie) con las siguientes posiciones desde el centro de la placa de carga:

0,00; 0,30; 0,45; 0,60; 0,90; 1,20 y 1,80 m. Durante el ensayo se registraron las temperaturas del ambiente y de la superficie del pavimento por medio del equipamiento instalado en el propio deflectómetro de impacto FWD y un sensor termoeléctrico.

La primera auscultación se llevó a cabo en condiciones diurnas y la segunda en condiciones nocturnas, de manera que las temperaturas de ensayo fueran lo más próximas a las temperaturas contempladas en proyecto. Durante el tratamiento de la información obtenida en la primera auscultación, se seleccionaron un conjunto de datos de acuerdo con los siguientes criterios:

- El cuenco de deflexión que mejor se ajusta al percentil 50 de deflexión.
- El cuenco de deflexión que mejor se ajusta al percentil 85 de deflexión.
- Los puntos con un espesor conocido de mezcla HMBM, gracias a la toma de testigos.

Los datos de la segunda inspección se procesaron siguiendo los mismos criterios.

Los datos de cada una de las auscultaciones realizadas con FWD, junto con los datos de los testigos extraídos, hicieron posible la determinación de los módulos de rigidez, tanto de las distintas capas del firme como de la explanada. El procedimiento se basó en la realización de un proceso de cálculo inverso utilizando el programa ELSYM5 desarrollado por la Universidad de Berkley en 1985.

Los resultados de este estudio pusieron de manifiesto que:

los módulos de rigidez obtenidos para la explanada fueron de la misma magnitud a los valores adoptados en proyecto;

fue posible deducir la influencia del contenido de humedad en los módulos de rigidez de las capas granulares;

Los módulos de rigidez obtenidos en las capas de mezcla de alto módulo HMBM, en algunas secciones, fueron inferiores a los que se habían estimado en proyecto.

#### ***6.2.3.2. Control de calidad con FWD para la recepción provisional y definitiva de mezclas asfálticas***

El tramo de la EN244 que conecta Ponte de Sôr con el enlace con la EN118, muestra la utilización del FWD para la recepción de los trabajos y la verificación del cumplimiento de las especificaciones en obras de extendido de mezclas asfálticas. Este sistema es parte integrante de los contratos públicos de carreteras que licita la administración portuguesa de carreteras, salvo en los contratos de conservación ordinaria. En la práctica habitual portuguesa hay dos fases en el control de calidad para la recepción de obras de carretera: una primera recepción provisional que se realiza inmediatamente después de finalizar la construcción, y una recepción final tras el periodo de garantía, que es de cinco años para los firmes de carretera.



*Figura 6.2-3 - EN244 – Obra de mejora Ponte de Sôr / EN118 (Portalegre), longitud 24.2 km de longitud*

En esta carretera se ha empleado una mezcla semicaliente reciclada en central en capa intermedia.

Para la recepción provisional o definitiva, se han realizado una serie de ensayos para evaluar el estado del pavimento: regularidad longitudinal (IRI), macrotextura, resistencia al deslizamiento y módulos de rigidez (para compararlos con los utilizados en la fase de proyecto). Para ello, se llevaron a cabo ensayos con FWD en la rodada derecha de cada carril, en ambos sentidos a lo largo de toda la obra. La distancia entre los puntos de ensayo fue de 100 m en el carril de pesados y 200 m en el resto de carriles, aunque en aquellos tramos de menor longitud se ha reducido a 50 m. En cada punto se han realizado 3 impactos con una carga de 65 kN. Se utilizó una placa de carga de 0,30 m de diámetros y se midieron las deflexiones en la superficie del firme a una distancia de 0,00; 0,30; 0,45; 0,60; 0,90; 1,20; 1,80 y 2,10 m desde el centro de la placa de carga. La temperatura del pavimento se midió de forma sistemática durante la toma de datos, debiendo estar comprendida entre 0 – 30°C a una profundidad superior a 40 mm.

Los datos del FWD se normalizaron para una carga de 65 kN, y se aplicó el método de sumas acumuladas para dividir el tramo en subsecciones homogéneas. Para cada subsección homogénea se realizó un proceso de cálculo inverso, utilizando el cuenco de deflexión con mejor ajuste a un percentil 85, y tomando como referencia la estructura del firme adoptada en proyecto y la construida en obra, estimándose el módulo de rigidez de las distintas capas del firme y de la

explanada. Estos módulos de rigidez se compararon con los valores de proyecto para comprobar si la estructura real del firme proporciona la capacidad portante necesaria para el tráfico de proyecto.

En la fase de recepción provisional, en cada sección homogénea el valor estimado de la vida residual al final del periodo de proyecto no puede ser inferior a la cantidad considerada en el diseño para el mismo periodo. En la recepción final, tras 5 años de servicio, la evaluación de la capacidad portante se realiza únicamente si se trata de una rehabilitación de todo el espesor del firme o el espesor de mezcla asfáltica es mayor de 0,10 m. En estos casos, los módulos de rigidez de las distintas capas tienen que ser al menos iguales a los valores obtenidos en la recepción provisional.

En el caso de la EN244 los resultados obtenidos indican que:

- los módulos de rigidez de la explanada fue del mismo orden de magnitud que los adoptados en proyecto;
- los módulos de rigidez de las capas granulares fueron del mismo orden de magnitud que los adoptados en proyecto;
- los módulos de rigidez de las mezclas asfálticas fueron del mismo orden de magnitud que los adoptados en proyecto o incluso mayores;
- el firme construido presenta la capacidad portante necesaria para soportar el tráfico estimado en la fase de proyecto.

### 6.3. DESARROLLO DE UN DEFLECTÓMETRO DINÁMICO DE PEQUEÑO TAMAÑO EN JAPÓN

#### 6.3.3. Estudio preliminar

La auscultación de firmes con equipos dinámicos ha sido muy estudiada en Estados Unidos y Europa desarrollándose algunos equipos montados en camiones tipo semirremolque. En EE.UU. se han desarrollado los equipos tipo Deflectómetro de Carga Rodante (RWD) mientras que el Deflectómetro a Velocidad de Tráfico (TSD), fabricado por la compañía Greenwood en Dinamarca, se comercializa en todo el mundo. Sin embargo estos equipos instalados en grandes camiones tipo semirremolque hacen difícil su uso en Japón ya que a menudo incumplen la normativa nacional sobre vehículos y tráfico; además muchas carreteras son tan estrechas, tortuosas o empinadas que hacen que este tipo de vehículos tengan dificultades físicas para circular por ellas, incluso en autopistas interurbanas. Por todo ello, surgió la necesidad de desarrollar un sistema dinámico de medida de las deflexiones específico para su empleo en Japón, capaz de proporcionar medidas precisas a escala nacional.

Desde 2010 un equipo de desarrollo, dirigido por la Universidad Agrícola de Tokyo y el Centro de Estudios de Obras Públicas (PWRI)", cuenta con una subvención del gobierno para desarrollar un Deflectómetro Dinámico (MWD – Moving Weight Deflectometer).

#### 6.3.4. Estudio previo sobre la utilización de sensores laser

El primer objetivo del equipo de desarrollo fue confirmar que el prototipo MWD podría utilizarse para obtener unos datos adecuados y comparables con los obtenidos utilizando vehículos de tipo semirremolque en ensayos anteriores. La **Figura 6.3-1** muestra el prototipo de un MWD en un camión de chasis corto y equipado con equipos laser.

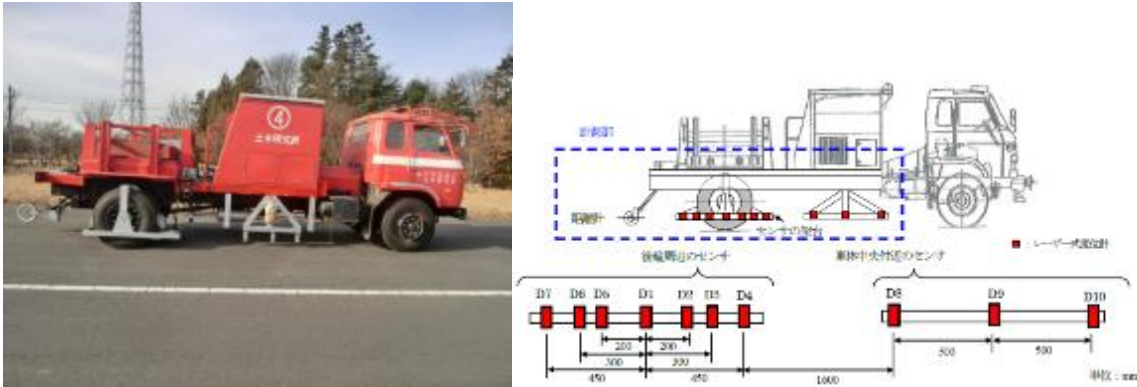


Figura 6.3-1 : Prototipo MWD de chasis corto con sensores láser.

Como resultado, se constató que el vehículo tiene un número de onda específico comprendido entre 2 y 3 Hz en función de la regularidad de la carretera o de las vibraciones producidas cuando el equipo está en movimiento. La **Figura 6.3-2** muestra una comparación entre las diferencias de deflexiones obtenidas en un tramo de ensayo del PWRI con deflectómetro de impacto (FWD) y con MWD cada 10 m. Aunque se ha observado una cierta correlación, el sistema presenta limitaciones en cuanto a la precisión para los firmes actuales, generalmente asociados a una regularidad aleatoria.

El uso de sensores de vibración Doppler está ampliamente extendida en el control del estado de puentes ferroviarios. La ventaja principal de estos sensores es que obtienen directamente la velocidad de deflexión, en lugar de la deflexión, por lo que sea cual sea la regularidad del firme no afectará a la medida. Por lo tanto con la instalación de sensores Doppler en el MWD se espera que mejore la precisión de medida, algo que está en cierto modo corroborado por el hecho de que el TSD de Greenwood también está equipado con este tipo de sensores.

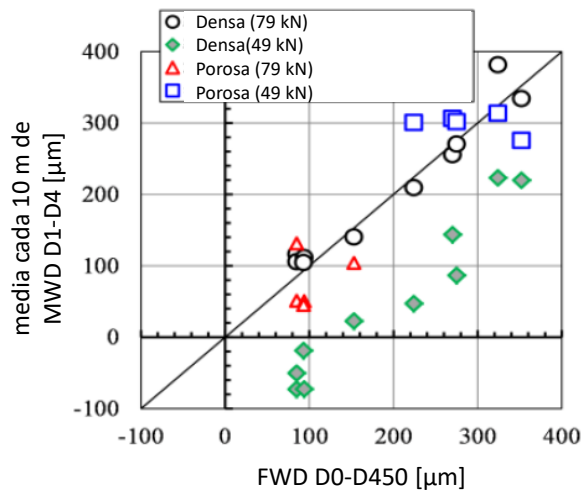


Figura 6.3-2 : Comparación entre las diferencias de deflexión medidas con FWD y MWD

**6.3.5. Fundamentos de base sobre la utilización de sensores Doppler**

Al reemplazar en la realización de los ensayos los sensores láser de distancia por sensores de vibración Doppler la medida de la velocidad de deflexión se efectúa según se indica en la **Figura 6.3-3**. En general, dado que una curva de deflexión alrededor de una rueda puede ajustarse con ayuda de una función exponencial, es posible conocer el valor de la deflexión máxima por medio de la medida directa de la velocidad de deflexión.

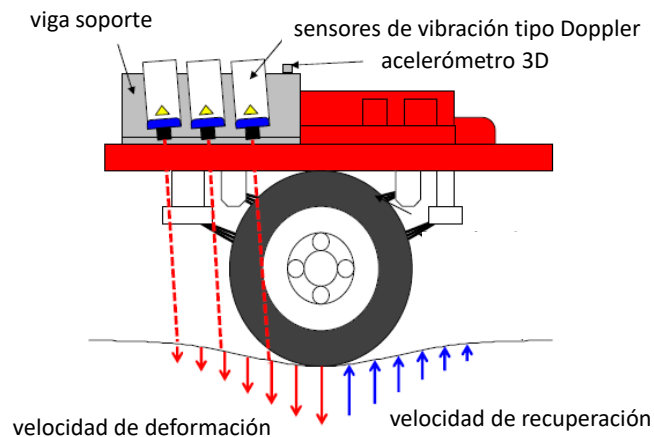


Figura 6.3-3 : Sistema de sensores de vibración Doppler

### 6.3.5.1. Características de los sensores del MWD

Como se muestra en la **Figura 6.3-4**, se colocaron tres sensores de vibración Doppler sobre el chasis del vehículo próximos a la rueda trasera izquierda del camión. Además, para eliminar las vibraciones próximas a los sensores se instaló también un acelerómetro tridimensional en el chasis. Los sensores Doppler están instalados a 145,8 cm de la superficie de rodadura. Para medir la velocidad del vehículo se instaló un registrador de velocidad (ver **Figura 6.3-5**) y un dispositivo que permite registrar también la distancia para localizar el punto exacto de medida, ver **Figura 6.3-6**. El muestreo de datos se realiza a una frecuencia de 2000 Hz.

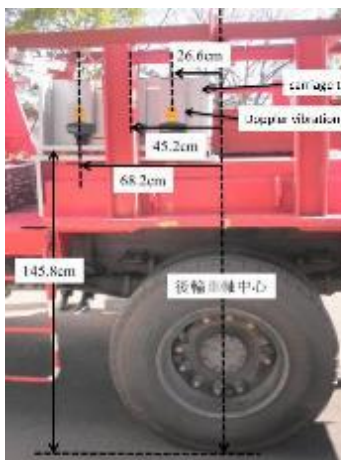


Figura 6.3-4 : Sensores de vibración Doppler



Figura 6.3-5 : Medidor de velocidad del vehículo



Figura 6.3-6 : Medida de la distancia

### 6.3.5.2. Anulación del ruido por medio de un análisis de ondículas

Las medidas obtenidas por medio de los sensores Doppler implican la velocidad objetivo de deflexión así como ruidos indeseados de aceleración que deben de ser anulados. Aunque se intente anular estas vibraciones con la instalación de amortiguadores de goma o resortes antivibración entre los sensores y el chasis, solamente se anulan unas determinadas frecuencias y a la vez se producen otros ruidos que desestabilizan la medida directa. Por lo tanto en vez de sistemas de amortiguación mecánicos se ha decidido utilizar una aproximación software más sofisticada basada en el análisis de ondículas de tal forma que se anulen los datos.

El análisis de ondículas se apoya sobre los componentes de una serie cronológica y del número de ondas. Como se muestra en la **Figura 6.3-7**, el análisis transforma los datos bajo la forma de

pequeñas ondas u ondículas, que indican la correlación con las ondas irregulares producidas por el vehículo MWD como resultado, entre otros, de la regularidad de la carretera.

Tras la transformación del filtrado por ondículas de Daubechies sobre los datos de vibración medidos inicialmente, se puede obtener un filtro de ruido capaz de reducir al máximo las vibraciones. Posteriormente se realiza el procedimiento de filtrado o de anulación del ruido aplicado a la velocidad objetivo de deflexión transformada. La **Figura 6.3-8** es un ejemplo de la velocidad de la deflexión filtrada por ondículas en comparación con los datos medidos inicialmente. Tras el filtrado o anulación del ruido, la tendencia de la deflexión se mantiene estable.

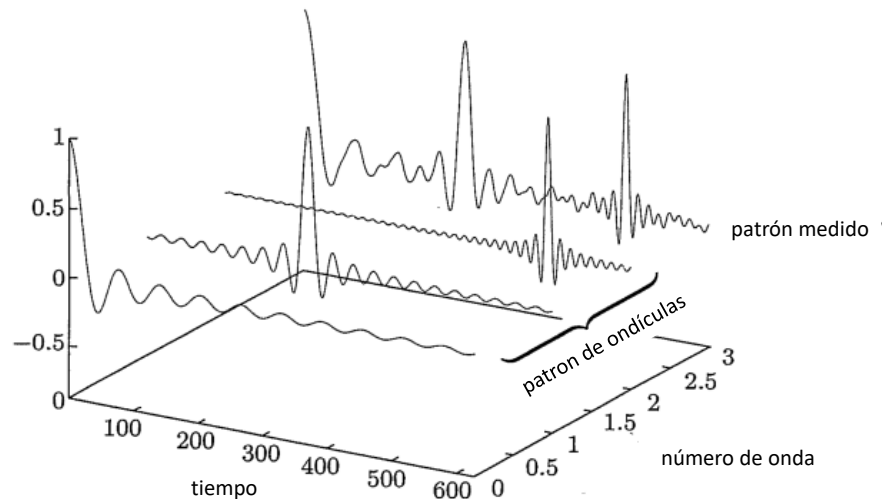


Figura 6.3-7 : Principio del análisis por ondículas

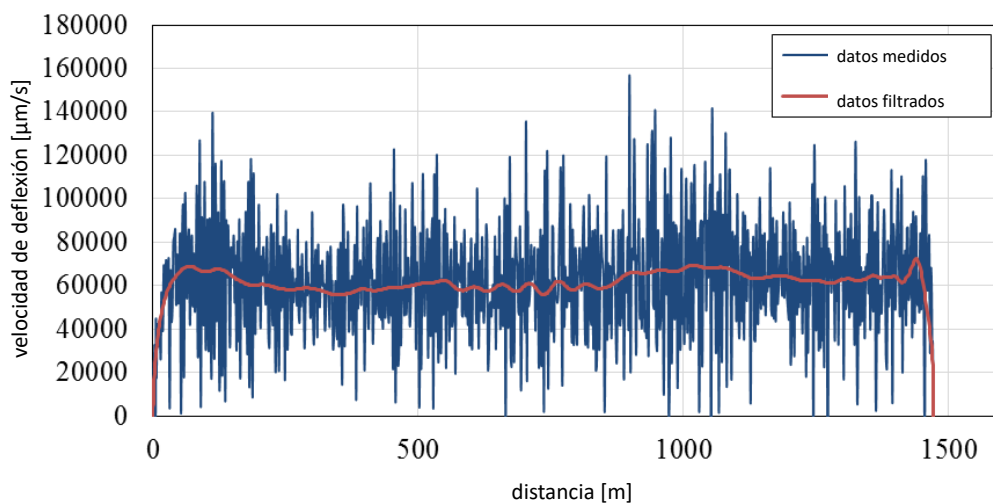


Figura 6.3-8 : Medida de la velocidad de deflexión y datos filtrados por ondículas

### 6.3.6. Realización de un ensayo con MWD

Sobre la pista de ensayos circular del PWRI se seleccionó un tramo de 1.400 m para hacer una serie de pruebas de contraste con FWD como se muestra en la **Figura 6.3-9**.

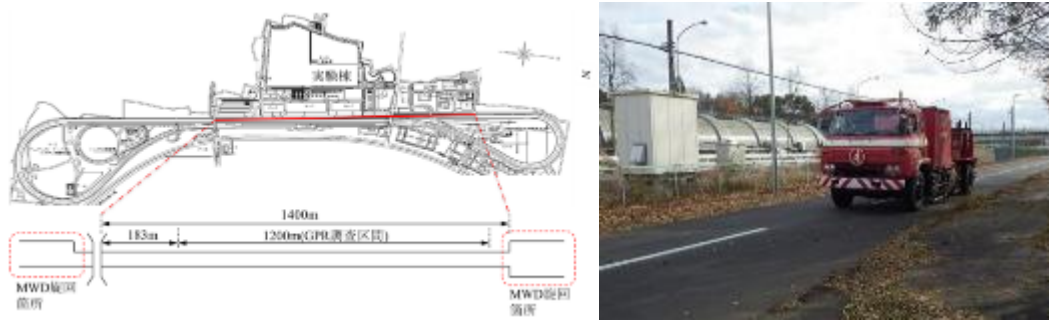


Figura 6.3-9 : Pista destinada a los ensayos MWD y FWD

Como ya se ha indicado, se compararon las deflexiones máximas con FWD con los valores máximos obtenidos con MWD para distintas velocidades tras anular el ruido mediante análisis de ondículas. En la figura **Figura 6.3-10** se muestra un ejemplo. Los datos 2013(1) y 2013(2) representan la máxima deflexión tras el análisis de ondículas. Los datos 2012 son también deflexiones con MWD pero tras realizar una media en pequeños tramos utilizando un Sistema antivibración instalado en el chasis del camión. Es obvio que se produce una apreciable mejora de la correlación entre los datos del FWD y del MWD tras incorporar el análisis de ondículas en 2013.

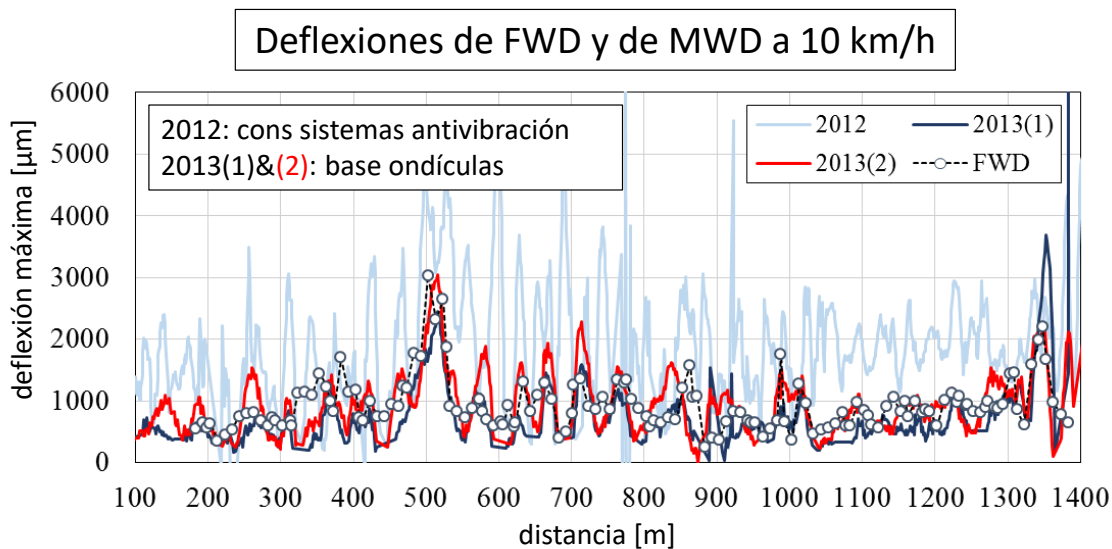


Figura 6.3-10 – Comparación de las deflexiones máximas FWD y MWD.

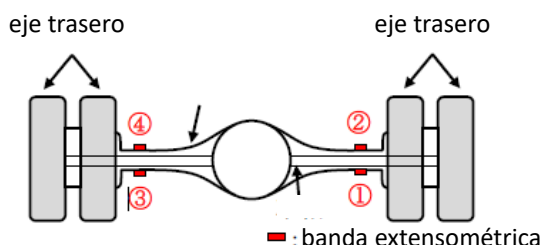
Sin embargo, la correlación entre MWD-FWD decrecerá con el aumento de la velocidad medida debido a la frecuencia de muestreo de 2000 Hz, al reducirse el número de datos por longitud de medida. Además, a velocidades mayores se reduce también la precisión en la medida de la distancia de ensayo. Por tanto, es preciso mejorar la densidad de muestreo y la precisión en la medida de la distancia.

### 6.3.7. Desarrollo de un MWD de tamaño mediano

El apartado anterior se empleaba un vehículo pesado como soporte o estructura para la instalación del MWD obteniéndose una buena correlación con las medidas de FWD. Con el objetivo de conseguir un equipo práctico y de fácil utilización se ha instalado el sistema en un equipo ligero que cumple la normativa en materia de vehículos y transporte, siendo necesario comprobar de nuevo las medidas que se obtienen con este equipo. Por todo ello, el grupo de estudio ha utilizado un vehículo de tamaño mediano para confirmar la viabilidad y aplicabilidad del MWD empleando el sistema de láseres Doppler.



Dado que los cambios en la carga por rueda y en la temperatura de la superficie del firme pueden afectar a la deflexión durante las medidas del MWD, se han de medir ambos parámetros de forma permanente. Para ello, se colocó un termómetro junto al sensor de velocidad, y se instalaron 4 bandas extensométricas para medir la carga por rueda, ver **Figura 6.3-11**. Tras analizar las correlaciones entre la carga por rueda en movimiento y las deformaciones en cada banda, se observó que la banda 4 era la que proporcionaba los mejores resultados. De esta forma es posible evaluar indirectamente la carga por rueda en tiempo real.



*Figura 6.3-11 – Medida de la carga en movimiento*

### 6.3.8. Ensayos realizados con el MWD en vehículo de tamaño medio.

Cuando se realizan medidas con el MWD en carretera se espera que la deflexión estará influenciada por cambios que se produzcan en la carga por rueda debido al estado del firme y cambios en la temperatura de la superficie de éste. Por medio de la medida de las deformaciones en la banda extensométrica número 4 y de la temperatura del firme se analizó su posible impacto sobre el valor de las deflexiones. La **Figura 6.3-12** muestra el equipo de tamaño medio (tipo furgoneta) equipado con todos los sistemas descritos. Los ensayos se llevaron a cabo a lo largo de los 1.400 m de la pista de ensayo.



*Figura 6.3-12 – MWD de tamaño medio*

La **Figura 6.3-13** Muestra la buena correlación en general de los datos registrados por el nuevo MWD, el prototipo MWD y el FWD.

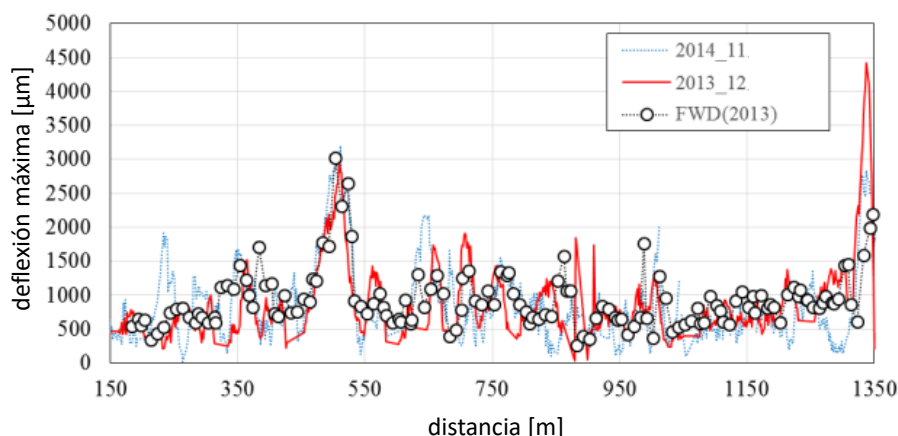


Figura 6.3-13 – Comparación entre las deflexiones del Nuevo MWD, del prototipo MWD y del FWD

### 6.3.9. Conclusion

Aunque se han adquirido conocimientos y experiencias esenciales basadas en los datos previos obtenidos desde 2010, el equipo de desarrollo está todavía trabajando junto con las más importantes agencias para una futura utilización práctica del MWD de tamaño medio.

### 6.3.10. Referencias

- [1] Development of a smaller-size moving weight deflectometer in Japan, SURF 2018, Brisbane, Keizo Kamiya (NEXCO Research Institute, Japan) et al.

## 6.4. INSPECCIÓN DE DETERIOROS SUPERFICIALES A PARTIR DE IMÁGENES DE 360° EN ESTONIA

### 6.4.3. Introducción

La red de carreteras nacionales de Estonia tiene una longitud de 16,605 km de los cuales 11,900 km están pavimentados (**Figura 6.4-1**). Para mantener y mejorar el estado de estas carreteras y planificar las diferentes opciones de tratamiento, la Administración de Carreteras necesita información sobre el estado de las mismas. En Estonia el estado de las carreteras se evalúa en base al perfil transversal (roderas), la regularidad longitudinal (IRI), la textura (MPD), los deterioros superficiales y las deflexiones (FWD). Todos estos datos se auscultan a nivel de red y se almacenan en una base de datos denominada “Banco de Datos de Carreteras” (RD - Road Databank) con la que se alimenta el Sistema de Gestión de Firmes de Estonia (EPMS) para analizar el estado de las carreteras y determinar la necesidad de actuaciones de reparación o de conservación.



Figura 6.4-1 – Red nacional de carreteras de Estonia en 2017

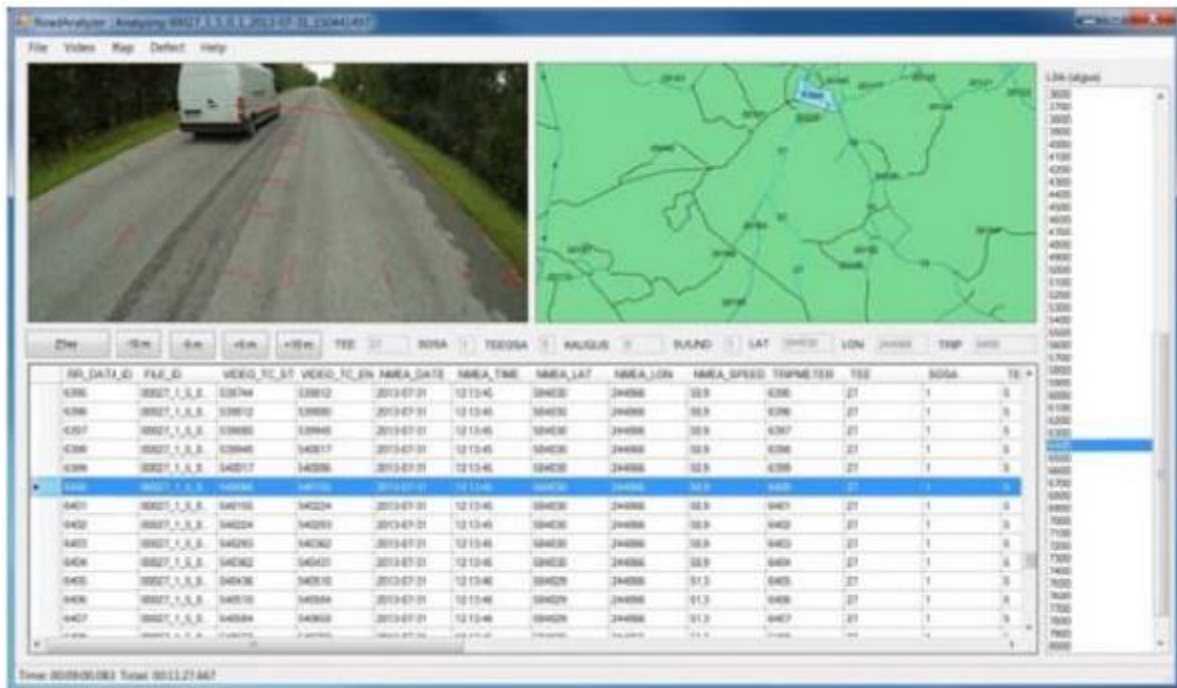
#### 6.4.4. Historial de toma de datos de deterioros superficiales

Desde 1995 la Administración de Carreteras ha recopilado de forma regular datos de los deterioros de las superficies pavimentadas a nivel de red. En sus inicios la Administración de Carreteras realizaba manualmente la inspección por medio de una “calificación de parabrisas”. Los datos observados se registraban en papel por un pasajero en el vehículo de reconocimiento que circulaba a una velocidad comprendida entre 5-20 km/h. Había 15 equipos de 2 personas que tomaban los datos, cada uno de ellos en provincias diferentes. En 1999 se incorporó un teclado pre-programado para almacenar los datos por medio de un ordenador durante el proceso de calificación del parabrisas. Este cambio permitió realizar el trabajo en menos tiempo con lo que el número de equipos se redujo a cuatro. La red de carreteras se dividió en cuatro regiones y cada equipo cubría entre 3 y 4 provincias.

Entre 2005 y 2009 la Administración de Carreteras comenzó un proceso de externalización de la toma de datos. Desde 2009 la Administración de Carreteras se encarga de la recogida de datos de deterioros de toda la red pavimentada. La toma de datos se dividió en 4 regiones con un contrato por un periodo de 3 años. La calificación del parabrisas se siguió utilizando para la toma de datos. El principio para seleccionar los tramos de carretera pavimentada para su mantenimiento consistía, cada dos años, en sumar los datos de deterioros en tramos de 100 m utilizando los criterios del Sistema de Direccionamiento de Carreteras de Estonia. Los datos se cargaban entonces en el banco de datos de carreteras (RD).

En 2013 la Administración de Carreteras obtenía los deterioros superficiales en base a imágenes en el marco de un nuevo contrato de 3 años de duración que cubría la red pavimentada completa. El contratista tenía que registrar los tramos de la red con una cámara de alta resolución y crear un software que permitiera detectar los deterioros en base a los videos tomados. Utilizando el software el contratista tenía que evaluar las áreas, el número y la longitud de los diferentes

deterioros. Un ejemplo del tipo de salida que proporcionaba la herramienta puede observarse en el la **Figura 6.4-2**.



*Figura 6.4-2 – Detección de defectos*

Este método permitía a la Administración de Carreteras controlar los datos tomados y procesados por el contratista pero continuaba basándose en estimaciones. En algunos casos había diferencias de interpretación entre la Administración de Carreteras y los algoritmos de análisis empleados por el contratista. En comparación con los procedimientos anteriores éste era más rápido, seguro y preciso pero también más caro.

#### 6.4.5. Nuevas necesidades y nuevas soluciones

Tras la finalización del último contrato de tres años, la Administración de Carreteras decidió adquirir una nueva solución para la toma de datos de deterioros. Los motivos principales del cambio fueron el elevado coste de la detección automática de los deterioros registrados (ya que para ello era necesario traer equipos del extranjero), las soluciones existentes no proporcionaban exactamente lo que la Administración de Carreteras necesitaba, que era un enfoque más robusto con menos análisis subjetivo y el deseo de registrar también la pérdida de árido. En 2016 la Administración de Carreteras firmó un nuevo contrato de 3 años (2016-2018) con dos empresas estonias, el Centro Técnico de Carreteras de Estonia y Reach-U, que presentaron una oferta conjunta para la inspección de deterioros del firme. De acuerdo con los términos del contrato, el Contratistas tenían que tomar fotografías para registrar los deterioros, desarrollar el programa informático para detectar y digitalizar los deterioros del firme a partir de esas fotografías, registrar la posición de los deterioros (por ejemplo, la localización) en el Sistema de Direccionamiento de Carreteras de Estonia en términos de coordenadas GPS y proporcionar la longitud, el área y determinadas características para varios tipos de defectos. El Contratista tenía que entregar a la Administración de Carreteras los datos en una capa de mapa digital (formato shp) y en un formato de tablas que permitiera su importación directa al RD.

Las fotografías se tomaron con una cámara Ladybug 5 y su posición se registró con un Sistema inercial GPS con dos antenas (**Figura 6.4-3**). Esta cámara dotada de cinco lentes proporciona una visión de 360°. Las imágenes se almacenaron en formato HD con una calidad de 1080p y con las coordenadas GPS. Durante la toma de datos se empleó un disco externos de 6 TB para guardar los

videos. Las imágenes se tomaron a una velocidad de medida de 50-60 km/h. Durante los 3 años se inspeccionaron unos 6.500 km de carreteras anuales; el tamaño de los datos adquiridos es de aproximadamente 45 TB. Los datos se procesaron para crear imágenes panorámicas y un video del pavimento y se desarrolló el programa 'EyeVi' para detectar y digitalizar los deterioros del firme. Los resultados de las imágenes y la precisión en la detección de los deterioros del EyeVi se controlaron y calibraron con anterioridad a la realización de los trabajos de campo.



Figura 6.4-3 –Camara ladybug 5 instalada en el vehículo

#### 6.4.6. Programa informático y digitalización de deterioros

El programa en web EyeVi, que utiliza como entrada las imágenes panorámicas y los ortovideos del pavimento, se desarrolló para detectar y digitalizar la información de los deterioros superficiales del firme. En el programa EyeVi, las imágenes panorámicas y los ortovideos están vinculados con el eje de la carretera para posicionarlos con precisión. Como datos adicionales se utilizan La capa de ortofoto pública del Instituto Geográfico y Catastral de Estonia ("Estonian Land Board") (Figura 6.4-4) y la capa del mapa base Reach-U (Figura 6.4-5).



Figura 6.4-4 – Ortofoto en EyeVi



Figura 6.4-5 – Mapa Reach-U en EyeVi

EyeVi permite al usuario navegar por imágenes panorámicas, ortovideos y mapas. Un motor de búsqueda permite buscar posiciones por el Sistema de Direccionamiento de Carreteras de Estonia o por kilómetros de carretera. La digitalización de los deterioros se realiza en la vista de ortovideo del pavimento que puede reproducirse a distintas velocidades (5 km/h, 10 km/h y 20 km/h), detenerse, ampliarse o reducirse (**Figuras 6.4-6 a 9**).



*Figura 6.4-6 – Máximo reducción*



*Figura 6.4-7 – Ampliación*



*Figura 6.4-8 – Ampliación*



*Figura 6.4-9 – Máxima ampliación*

Para permitir la digitalización de distintos deterioros, EyeVi dispone de herramientas que permiten al usuario dibujar y medir anchuras, longitudes, distancias y áreas en la vista de ortovideo. Durante la digitalización los deterioros del firme se clasifican en:

- baches,
- fisuras longitudinales (anchas o estrechas),
- fisuras transversales,
- fisuras en juntas (anchas o estrechas),
- rotura de borde,
- parches,
- piel de cocodrilo,
- pérdida de árido.

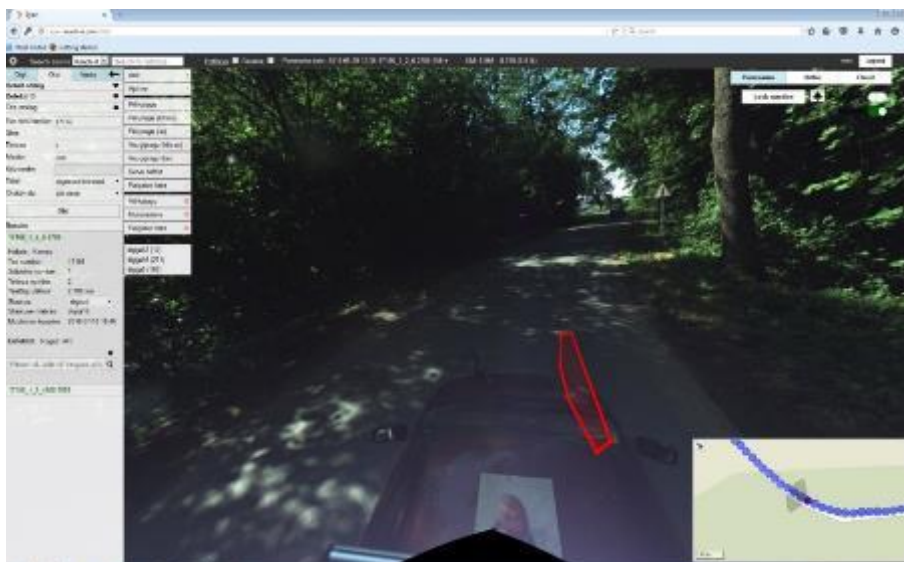
La vista panorámica permite una reconstrucción de 360 ° para visualizar las áreas circundantes. Es posible también activar y desactivar los deterioros digitalizados en la vista ortovideo y en la vista panorámica (Figuras 6.4-10 y 11).

*Figura 6.4-10 – Vista ortovideo**Figura 6.4-11 – Vista panorámica*

El rendimiento de la digitalización por persona fue de 3 a 20 km de carretera al día, dependiendo de la calidad del ortovideo y del número de deterioros. Los lugares en los que la calidad del ortovideo no era suficientemente buena requerían que el usuario realizara inspecciones adicionales utilizando la vista panorámica. La capa de deterioros digitalizada puede utilizarse para generar mapas o procesar datos. Antes de aceptar la capa del mapa digital y las tablas de datos la Administración de Carreteras realizó verificaciones aleatorias para estimar la calidad del trabajo. Esta nueva solución permite un control más preciso de los datos recopilados y presentados por el Contratista, en comparación con los procedimientos anteriores, ya que todos los deterioros están digitalizados.

#### 6.4.7. Problemas

Durante el desarrollo del proyecto hubo algunos problemas que tuvieron que ser resueltos. Durante el trabajo de campo, el ángulo del sol, la luz reflejada en el pavimento o las sombras arrojadas por los árboles adyacentes, por ejemplo, (**Figura 6.4-12**), dificultaron la detección de deterioros en las imágenes. La lluvia planteó también un problema al no ser las imágenes suficientemente nítidas a velocidades altas de toma de datos. Durante el procesamiento de los datos hubo algunos problemas con los datos GPS inexactos, pero en general no hubo demasiados problemas y la mayoría de éstos se produjeron durante el primer año.

*Figura 6.4-12 – Sombra de arboles en la carretera*

#### 6.4.8. Conclusiones

La Administración de Carreteras se mostró satisfecha con el resultado del contrato (2016-2018) y contrató la detección de deterioros con la misma solución para los próximos tres años (2019-2021). En comparación con los años anteriores, la recopilación y procesamiento de los datos de deterioros es ahora más precisa y rentable, y las capas de datos digitales permiten a la Administración presentar y utilizar los datos de varias formas.

### 6.5. EQUIPO DE REFERENCIA PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE MEDIDAS DE REGULARIDAD

#### 6.5.3. Antecedentes

La mayoría de las características superficiales de la carretera utilizadas en la planificación a largo plazo pueden relacionarse con la medida de la regularidad.

Los métodos para auscultar la regularidad y otros parámetros clave del estado de una red de carreteras están mejorando constantemente, evolucionando en línea con los desarrollos tecnológicos que incluyen tanto avances en software como en hardware. Los datos de estado auscultados, transformados en indicadores, se utilizan principalmente para la toma de decisiones a largo plazo. Esto requiere el desarrollo de modelos de predicción de las condiciones futuras. Para que estos modelos sean lo más precisos posible, los datos deben cumplir con estrictas exigencias de calidad.

El equipo de referencia se utiliza para garantizar que un determinado método de auscultación rutinario alcanza una cierta calidad requerida. También es útil cuando se valida cualquier método alternativo de inspección rutinaria. Si se establece una diferencia sistemática, los datos de referencia pueden utilizarse para normalizar los datos a una escala estándar.

El Big Data, y la creciente tendencia hacia la digitalización, han tenido un impacto significativo en la gestión de los activos y el mantenimiento de las carreteras. El Big Data puede caracterizarse por los cuatro V: Variedad (diferentes formas de datos), Volumen (escala de datos), Velocidad (análisis de datos de transmisión), Veracidad (incertidumbre de datos). Si bien los avances tecnológicos han permitido el almacenamiento y procesamiento de grandes cantidades de datos, la cuestión de la calidad de los datos obtenidos in situ sigue pendiente.

#### 6.5.4. Métodos de referencia

En la práctica, no se puede alcanzar un valor verdadero absoluto a un costo razonable para auscultar las características superficiales en toda una red de carreteras. Por lo tanto, se debe establecer un nivel aceptable de exactitud. Algunos requisitos de un equipo de referencia podrían ser: tener una resolución mayor que el equipo sometido a evaluación, mantener la precisión y estar disponible durante un largo período de tiempo, ya que algunos firmes de carretera pueden durar muchos años.

#### 6.5.5. Requisitos

En base a la experiencia, al seleccionar un método de referencia para la gestión de la calidad y la precisión necesarias deben tenerse en cuenta varios requisitos que han de cumplirse:

tramos de ensayo, tipo de superficie, posición de la toma de datos y una variación adecuada en el grado de severidad relacionada con la característica ensayada,

- gestión de datos (entrega de datos, Big Data),
- nuevos sensores y métodos,
- habilidades del operador,
- integración de software, e
- indicador utilizado adecuado.



### 6.5.6. Caso práctico: equipo utilizado en Suecia

En Suecia, se consideran dos características importantes en la auscultación de la superficie de las carreteras para los equipos de referencia específicos: la regularidad longitudinal y transversal a partir de perfiles medidos longitudinal y transversalmente. Por ello, se han desarrollado dos métodos de referencia. Para los perfiles transversales se usa un sistema XPS (escáner de perfiles transversales) y para los perfiles longitudinales de referencia, se utiliza un método que combina lecturas de una estación total y perfiles de alta resolución de secciones de corta longitud.

Existen también métodos de referencia definidos para todas las características superficiales de la carretera utilizadas en el sistema de gestión de las Administraciones de Carreteras Suecas, no solo para los perfiles longitudinales y transversales.

#### 6.5.6.1. Equipo de referencia de perfil transversal, XPS

El XPS consta de siete sensores de tipo escáner montados en un remolque, cada uno de los cuales cubre un ancho de hasta 0,70 m, de manera que combinados pueden medir un ancho de pavimento de 4 m (ver la Figura 6.5-1). El perfil transversal medido es casi continuo con un muestreo transversal cada milímetro. La precisión de altura es de 0,5 mm. El XPS cuenta también con un sistema GNSS e inclinómetro de alta precisión que permite posicionar los datos y medir la pendiente transversal simultáneamente. El XPS se usa tanto en estático como a baja velocidad.



Figura 6.5-1 – Sistema de referencia para la medida del perfil transversal medio y de la pendiente transversal.

Se seleccionan tramos significativos de ensayo de 1.200 m de longitud. Se pinta una línea a lo largo de la sección para identificar la posición transversal durante el ensayo. El XPS efectúa una medida cada 0,1 m a lo largo del tramo, obteniéndose aproximadamente 12.000 perfiles transversales. Estos perfiles constituyen la referencia y se tratan (filtran y promedian) según el tipo de ensayo y comparación a realizar. El gráfico superior de la **Figura 6.5-2** muestra los datos recogidos tras 15 medidas repetidas, cada una de ellas promediada sobre 0,1 m a lo largo del tramo de ensayo. Las líneas de puntos rojas corresponden al escáner contrastado y la línea negra es la referencia. Como se indica en el gráfico superior, es necesario ajustar la posición transversal para hacer una comparación precisa. La mayoría de los perfiles de escáner tienen una precisión tan alta que requieren un filtrado del perfil inicial para obtener un perfil válido que sirva para los cálculos del indicador de profundidad de rodera. El resultado del ajuste de posición transversal se muestra en el gráfico inferior y los perfiles están filtrados y corregidos para poder ser utilizados en el cálculo de indicadores, por ejemplo, índices de profundidad de rodera.

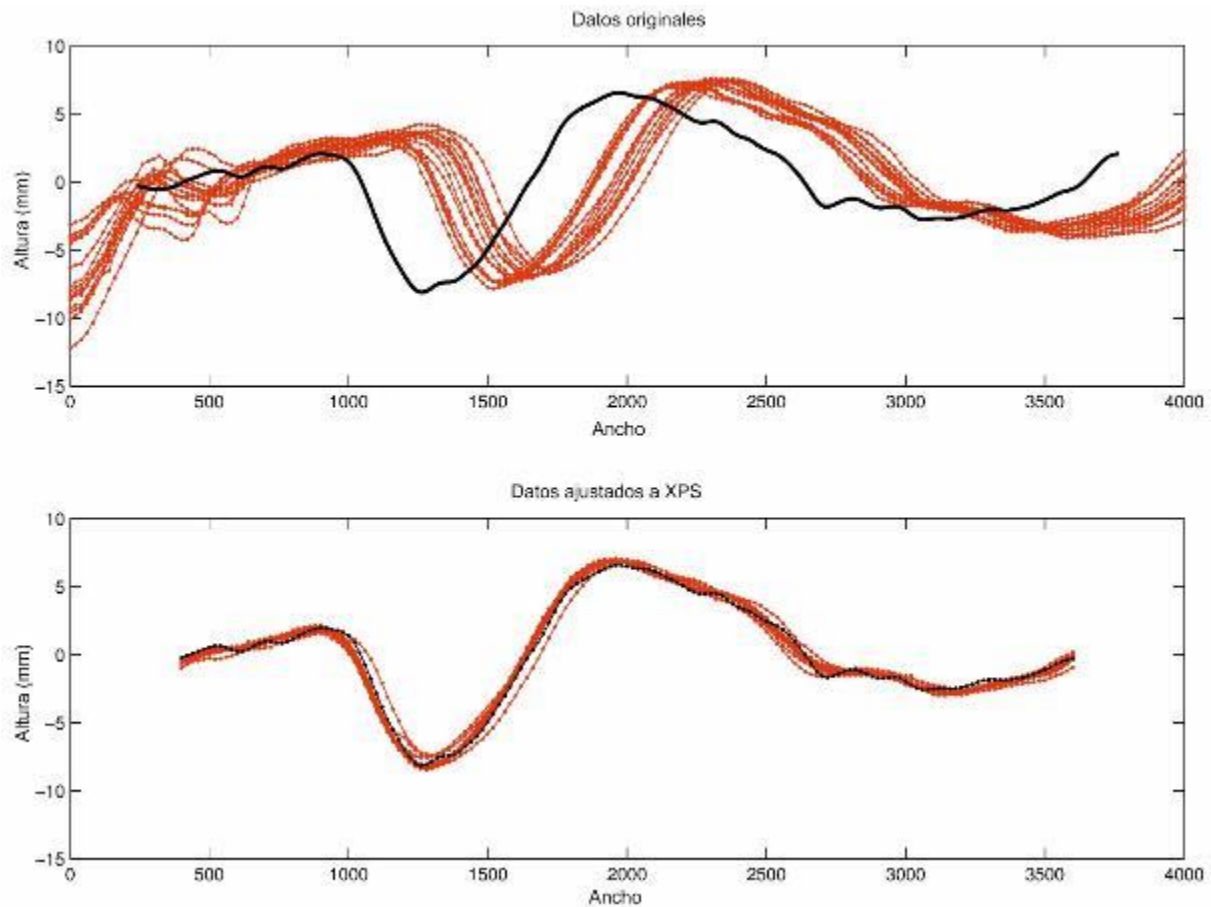


Figura 6.5-2 – Perfil transversal bruto y ajustado

#### 6.5.6.2. Estación total y equipo Primal

La estación total es el equipo utilizado tradicionalmente para los levantamientos topográficos. Utiliza un teodolito integrado con medida de distancia para medir los ángulos verticales y horizontales y la distancia de la pendiente desde el instrumento hasta un punto determinado. Se utiliza un ordenador a bordo para recopilar datos y realizar cálculos de triangulación, ver la **Figura 6.5-3** (izquierda). El Primal es un pequeño remolque robótico con un receptor de rayo láser y una rueda de medición que sigue el perfil de la carretera a lo largo del tramo de ensayo; ver la **Figura 6.5-3** (derecha).

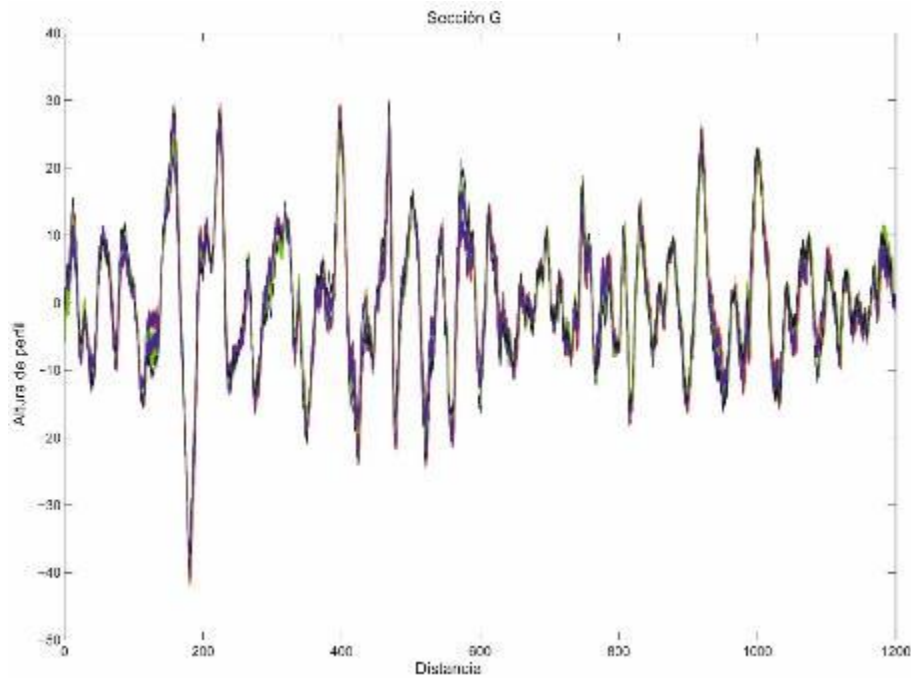


Figura 6.5-3 – Estación Total empleada para adquirir perfiles cada 10-m (izquierda) y el remolque robotizado primal utilizado como referencia del perfil longitudinal (derecha)

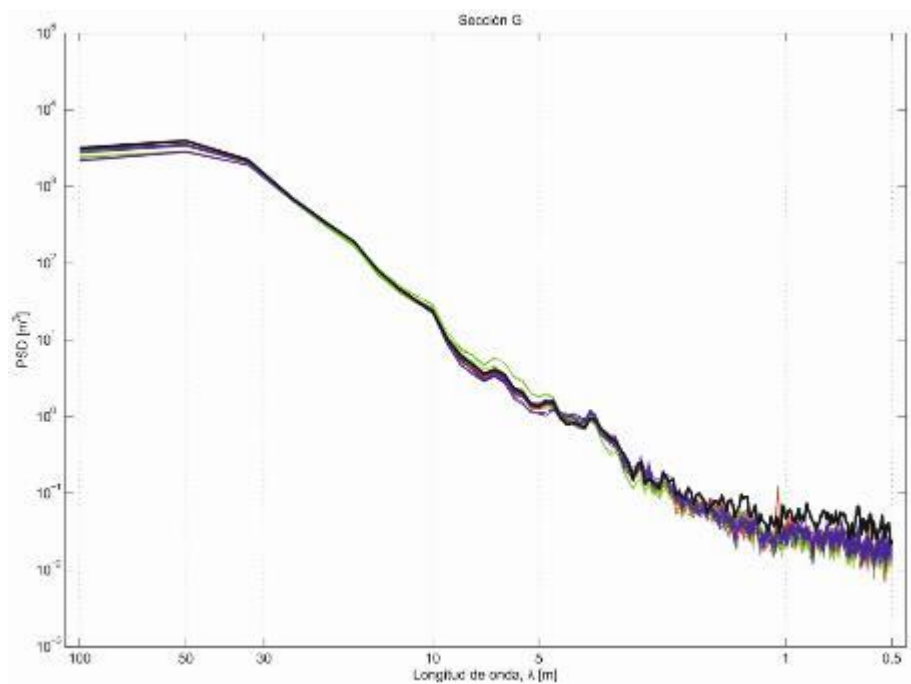
Al final del tramo de ensayo se coloca un emisor, posicionado en la sección de ensayo seleccionada, que transmite un haz láser paralelo a la sección de ensayo. El Primal se coloca en el inicio de la

sección de manera que el rayo láser emitido llegue a su receptor. El Primal comienza a moverse hacia el emisor del láser y, mientras se mueve, se registra la distancia vertical entre la rueda de medición del Primal y el rayo láser. Se recoge un valor de altura cada 0,04 m. Cada sección tiene una longitud de 10 m, por lo que es preciso medir un total de 120 secciones para completar un perfil de referencia de 1200 m. La estación total se utiliza para medir la altura de los puntos de inicio y final de cada segmento de manera que se puedan relacionar y conectar los segmentos entre sí.

La **Figura 6.5-4** ilustra 15 perfiles a partir de pasadas repetidas. La **Figura 6.5-5** muestra otra forma de presentar la relación entre los perfiles, utilizando la densidad espectral (espectro de frecuencia).



*Figura 6.5-4 –Repetición de 15 perfiles y su perfil de referencia*



*Figura 6.5-5 – Densidad espectral de potencia de 15 pasadas repetidas y la del perfil de referencia (negro)*

## 7. GLOSSARIO

TÉRMINO	DEFINICIÓN	
ABS	Anti-lock Braking System	Sistema Antibloqueo de Frenos
AI	Artificial Intelligence	Inteligencia Artificial
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex	Índice General de Desniveles
BPN	British Pendulum Number	Número del Péndulo Británico
CAN-bus	Controller Area Network computer communication system	Sistema de comunicación por ordenador de la Red de Área de Controlador
CBR	California Bearing Ratio	Índice Portante de California
CFME	Continuous Friction Measuring Equipment	Equipo de Medición Continua de Rozamiento
CMP	Common Mid Point	Punto Medio Común
Cr	Rolling resistance coefficient	Coefficiente de resistencia a la rodadura
CTM	Circular Texture Meter	Medidor Circular de Textura
DCP	Dynamic Cone Penetration	Ensayo de Penetración Dinámica
DFT	Dynamic Friction Tester	Medidor Dinámico de Rozamiento
EC	Evenness Coefficient	Coefficiente de Regularidad
ESP	Electronic Stability Programme	Programa Electrónico de Estabilidad
FCD	Floating Car Data	Datos Flotantes de Vehículos
FN	Friction Number	Número de Fricción
ESAL	Equivalent Standard Axle Load	Carga de Eje Estándar Equivalente
FWD	Falling Weight Deflectometer	Deflectómetro de Impacto
GNSS	Global Navigation Satellite System	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPR	Ground Penetrating Radar	Georadar
HD	High Definition	Alta Definición
IFI	International Friction Index	Índice de Fricción Internacional
IRI	International Roughness Index	Índice de Regularidad Internacional
IRT	Infrared Thermography	Termografía Infrarroja
ISO	International Organization for Standardization	Organización Internacional de Normalización
LCMS	Laser Crack Measuring System	Sistema Láser de Medida de Fisuras
LFC	Longitudinal (Force) Friction Coefficient	Coefficiente de Rozamiento Longitudinal
LiDAR	Light Detection And Ranging	Detección de Luz y Alcance
LWD	Light Weight Deflectometer	Deflectómetro Ligero
LVGR	Low Volume Granular Road	Carreteras Granulares de Bajo Tráfico
MPD	Mean Profile Depth	Profundidad Media de Perfil
MWD	Moving Weight Deflectometer	Deflectómetro Dinámico
NBO	Notes par Bandes d'Ondes	Notas por Banda de Ondas
NDT	Non Destructive Testing	Ensayo No Destructivo
PPP	Public Private Partnership	Participación Público Privada
PPS	Pavement Profile Scanner	Escáner de Perfiles del Pavimento
PSD	Power Spectrum Density	Densidad Espectral de Potencia
RRC	Rolling Resistance Coefficient	Coefficiente de Resistencia a la Rodadura
RWD	Rolling Wheel Deflectometer	Deflectómetro de Carga Rodante
SAE	Society of Automotive Engineers	Sociedad de Ingenieros Automotrices
SCI	Surface Curvature Index	Índice de Curvatura Superficial
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine	Equipo de Auscultación Ordinaria del Coeficiente de Fuerza Lateral
SDN	Stopping Distance Number	Número de Distancia de Parada
SFC	Side (Force) Friction Coefficient	Coefficiente de Rozamiento Transversal
SKM	Seitenkraft-Messverfahren	Método de Medición de la Fuerza Lateral
SN	Skid Number	Número de Deslizamiento
SRI	Skid Resistance Index	Índice de Resistencia al Deslizamiento
TCS	Traction Control System	Sistema de Control de Tracción

ToF	Time of Flight (camera)	Tiempo de Vuelo (cámara)
TRIMM	Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring and Management	Seguimiento y Gestión de la Infraestructura Vial del Mañana
TSD	Traffic Speed Deflectometer	Deflectómetro a Velocidad de Tráfico
WARR	Wide-Angle Reflection and Refraction	Reflexión y Refracción de Gran Ángulo
WLP	Weighted Longitudinal Profile	Perfil Longitudinal Ponderado



*Copyright World Road Association. Reservados todos los derechos.*

*Asociación Mundial de la Carretera (PIARC)*

*Arche Sud 5° niveau*

*92055 La Défense Cedex, France*

*ISBN: 978-2-84060-531-7*