

## **Borrador del informe del primer ensayo interlaboratorio para reflectómetros móviles**

**Investigación realizada en el marco de las actividades de CEN/TC226/W G2**



**Luc Goubert (BRRC, centro belga de investigación vial)**

**Sven-Olof Lundkvist (VTI, instituto nacional sueco de investigación vial y de transportes)**



**25 000**

**VIDAS QUE PUEDEN  
SALVARSE**

Centro europeo de seguridad vial

## 1 Presentación y objetivo del estudio

Los reflectómetros móviles están disponibles en el mercado y se utilizan para comprobar la retrorreflexión de las señales viales desde finales de la década de 1990. Anteriormente, se comprobaba el estado de las señales viales utilizando instrumentos manuales, pero el aumento del tráfico fue uno de los motivos que llevaron al desarrollo de instrumentos móviles. Los requisitos de los instrumentos y las mediciones manuales se establecen en EN-1436, anexo B. En este anexo también se mencionan los instrumentos móviles (instalados en vehículos):

*Se utilizan instrumentos instalados en vehículos para medir los valores  $R_L$  de las marcas viales mientras se circula a la velocidad del tráfico y pueden usarse para tramos de carretera más extensos que los instrumentos portátiles y en aquellos casos donde el uso de instrumentos portátiles requiera grandes precauciones, en particular en las autopistas.*

*En principio, los instrumentos instalados en vehículos deben cumplir los mismos requisitos que los instrumentos portátiles y deben ser capaces de compensar los movimientos del vehículo y los cambios en las condiciones de luz diurna. Sin embargo, el funcionamiento móvil puede ocasionar dificultades adicionales para la medición, lo que puede dar lugar a compromisos con los requisitos o provocar una mayor variación en los valores medidos.*

*Tanto los instrumentos portátiles como los instalados en vehículos deben calibrarse, mantenerse y utilizarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante del instrumento.*

Cuando se escribieron esos párrafos, la experiencia con reflectómetros móviles era escasa. Por este motivo fueron redactados en términos algo difusos, como "el funcionamiento a velocidad" ... puede dar lugar a compromisos con los requisitos o provocar una mayor variación en los valores medidos".

Desde que se revisó EN-1436 en 2006, el uso de instrumentos móviles ha aumentado y hay varios instrumentos disponibles en el mercado. Sin embargo, la experiencia con instrumentos más antiguos ha demostrado que las anteriores hipótesis eran correctas: los errores de medición son mayores para los instrumentos móviles que para los de mano.

Durante la reunión los días 18 y 19 de abril de 2010 en Estambul, CEN/TC226/WG2 pidió al panel de expertos que investigara esta cuestión mediante la organización de una prueba interlaboratorio. El objetivo de este estudio consistió en cuantificar dichos errores de medición, es decir, estimar la exactitud, la precisión, la incertidumbre y la repetibilidad de los instrumentos móviles disponibles actualmente en el mercado (septiembre de 2010). El objetivo consistió en ampliar el conocimiento, no solo de los errores de medición, sino también del funcionamiento de los instrumentos móviles, y usar esta información en una norma.

Para obtener más experiencia sobre los instrumentos móviles, el panel de expertos de WG2 organizó mediciones de demostración y validación en Bélgica entre el 13 y el 15 de septiembre de 2010. El programa de mediciones fue establecido por el BRRC (Luc Goubert) con la ayuda del VTI (S-O Lundkvist).

## 2 Método

Se invitó a los usuarios y fabricantes de reflectómetros móviles de Europa a participar en la evaluación y demostración de distintos tipos de instrumentos móviles. Dos usuarios y dos fabricantes respondieron afirmativamente, como muestra la Tabla 1 (en orden alfabético):

Tabla 1 Participantes en las mediciones de prueba en Bélgica en septiembre de 2010.

Empresa	País	Instrumento	Usuario/fabricante
DELTA Light and Optics	Dinamarca	LTL-M	fabricante
Ennis Prismo	Reino Unido	Ecodyn 30	usuario
Euroconsult NT Zehntner	España	Ecodyn 30	usuario
GmbH	Suiza	Zehntner ZDR 6020	fabricante

Los usuarios y fabricantes participaron por cuenta propia. Cada participante se encargó de la calibración del instrumento y de la presentación de los datos. Los tres tipos de instrumentos móviles, LTL-M, Ecodyn 30 y Zehntner ZDR 6020, se describen en profundidad en los anexos A, B y C, respectivamente. Se estableció con los participantes el compromiso de que los instrumentos no se identificarían en los capítulos que describen los resultados y las conclusiones. Por lo tanto, se asignó aleatoriamente a los instrumentos un número entre el 1 y el 4.

Se definieron previamente 23 lugares de prueba. Sin embargo, se excluyeron dos de ellos: uno debido a obras y otro porque fue imposible realizar las mediciones con instrumentos manuales debido al gran volumen de tráfico. Así, quedaron 21 lugares de pruebas, 19 líneas de carril continuas con bordes perfilados y dos discontinuas (3 m de línea y 9 m de separación), cada una de ellas con una longitud de 200 metros. Es posible encontrar la situación de los lugares de prueba e ilustraciones de las marcas correspondientes en el anexo E.

Para estimar la repetibilidad de los instrumentos móviles, se realizó más de una ronda de mediciones en ocho de los sitios. Los doce sitios de prueba restantes solo se midieron una vez. Las mediciones móviles se realizaron a unos 50 km/h y se tomaron todas las lecturas móviles en todos los sitios con una separación de menos de dos minutos. La figura 1 muestra los instrumentos móviles durante la medición del sitio de prueba número 1.



Figura 1 Los cuatro instrumentos móviles durante la medición del sitio 1

Se usaron como referencia las lecturas de un instrumento de mano del tipo LTL-2000 del fabricante DELTA. Se comprobó y calibró este instrumento tanto antes como después de la serie de medición

para asegurarse de que no hubiera sesgo alguno en los datos de referencia. Se tomaron lecturas con el instrumento de mano aproximadamente cada seis metros. Esto supuso 32-38 lecturas en cada sitio de prueba, excepto en cuatro sitios con mucho volumen de tráfico, donde solo se tomaron 18 lecturas repartidas de forma uniforme a lo largo del tramo. Debe señalarse que, aunque el instrumento de mano estaba debidamente mantenido, calibrado y operado, existe también incertidumbre sobre sus resultados, debido por un lado al muestreo y, por el otro, a la incertidumbre normal del instrumento (que no supera una desviación del 5% RMS, según el fabricante). Por lo tanto, considerar los resultados del instrumento manual como los valores "reales" es solo una aproximación de la realidad.

Todas las mediciones se llevaron a cabo entre el 13 y el 15 de septiembre de 2010 sobre superficies secas en condiciones climatológicas parcialmente nubosas. El tiempo de separación entre las mediciones manuales y móviles fue corto, de menos de una hora.

## 3 Análisis

### 3.1 Resultados de los instrumentos

En este estudio se han probado cuatro instrumentos diferentes de tres tipos distintos en comparación con las lecturas de un instrumento de mano. Es importante destacar que las lecturas de cada tipo de instrumento no representan la retrorreflexión de exactamente la misma zona:

Las lecturas **de mano** con el LTL-2000 se tomaron en el centro (transversal) de las marcas viales. Esto significa que los operadores decidieron dónde estaba el centro según su criterio. Esto puede ser difícil en una marca vial ancha (alrededor de unos 0,30 metros), lo que significa que en este tipo de marcas el punto de medición puede estar desviado alrededor de un par de centímetros. El área de medición del instrumento de mano es de unos 0,04 x 0,4 metros y en la mayor parte de los sitios de prueba se tomaron unas 35 lecturas. El muestreo supone que hay una incertidumbre en el valor  $R_L$  medio que depende del tamaño de la muestra y la variación de la retrorreflexión, tanto a lo largo como en transversal a las marcas viales.

El área medida del **instrumento móvil n.º 1** coincide con el área de las marcas viales, tanto longitudinal como transversalmente. Por consiguiente, las lecturas de este instrumento son comparables con las lecturas del instrumento de mano solo si la retrorreflexión de las marcas viales es homogénea.

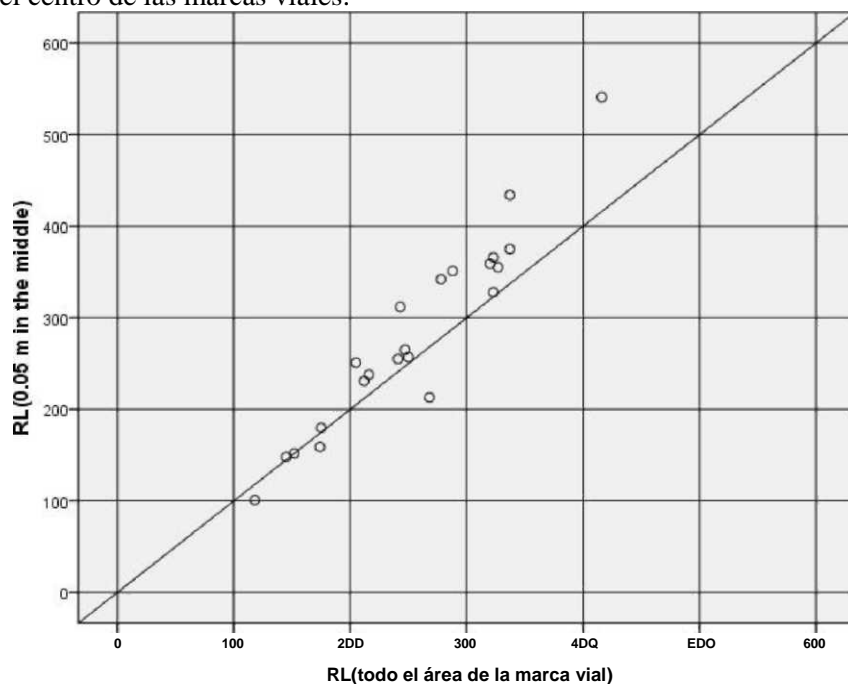
Los resultados de medición del **instrumento móvil n.º 2** pueden analizarse después de completar las mediciones y de obtener las lecturas de todas o alguna parte de las marcas viales. Esto significa que, al comparar con las mediciones del instrumento de mano, el área de medición debe estar situada en el centro de la línea y, al comparar con el instrumento n.º 1, debe usarse todo el área. Por lo tanto, los resultados del instrumento móvil n.º 2 son lecturas que representan 0,05 metros en el centro (transversal) de las marcas viales y, también, lecturas que representan todo el área de la marca vial.

El **instrumento móvil n.º 3** usa 14 células fotoeléctricas para medir la retroreflexión de las marcas viales. El resultado es una media de las dos células fotoeléctricas que muestren el valor más alto. Como cada célula fotoeléctrica cubre unos 0,04 metros, la lectura representa un valor con una anchura de 0,08 metros. Si la retrorreflexión de las marcas viales es homogénea, el resultado de este instrumento debe ser comparable a los resultados de los otros instrumentos. No obstante, si la retrorreflexión varía mucho transversalmente en las marcas viales, en la mayor parte de los casos el instrumento 3 deberá mostrar un valor mayor que el instrumento de mano. Solo si el valor máximo

está en el centro de la línea, las lecturas del instrumento 3 serían comparables con las lecturas del instrumento de mano y el instrumento móvil n.º 2.

El **instrumento móvil n.º 4** es de la misma marca que el instrumento n.º 3 y, por lo tanto, sus resultados deberían ser comparables con las lecturas de dicho instrumento.

La figura 2 muestra la diferencia en la retrorreflexión en función de si se tiene en cuenta todo el área o 0,05 metros en el centro de las marcas viales.



*Figura 2 Comparación de la retrorreflexión de 22 marcas viales cuando el resultado representa todo el área o 0,05 metros en el centro de la marca.*

La figura 2 muestra una desviación media de alrededor del 11 %. Lógicamente, la mayoría (18 de 22) de las marcas viales tiene el valor superior en el centro (transversal) de la superficie, ya que las lecturas son inferiores cuando el resultado se obtiene a partir de toda la superficie. No obstante, en todos los cálculos siguientes, la exactitud, la precisión y la incertidumbre se calculan usando las lecturas del instrumento de mano como referencia. En otras palabras, se consideró que LTL-2000 medía la retrorreflexión "real".

El resultado de los instrumentos móviles fue un valor medio de todo el sitio de prueba de 200 metros de longitud, pero también de este sitio dividido en franjas de 50 metros. No se ha utilizado este último resultado, ya que es difícil dividir el resultado de los archivos de mano en franjas de exactamente 50 metros. Por consiguiente, dicho análisis no contribuiría a las conclusiones de las mediciones. No obstante, un sitio de prueba, el número 9, estaba situado parcialmente en un túnel (50 metros al comienzo del tramo), donde las marcas viales estaban muy sucias. Se ha excluido esta parte de ese sitio de prueba y, por lo tanto, la longitud del sitio de prueba número 9 es de 150 metros.

El análisis de las lecturas de uno de los instrumentos móviles muestra que la retrorreflexión de las marcas viales en un sitio de prueba, el número 17, tiene una gran variación en la dirección transversal de la línea vial. Este hecho se ilustra en la figura 3, donde puede verse una estrecha banda clara a la derecha del centro de la superficie. Esta banda está situada a solo un par de centímetros del centro de

la marca vial y muestra una retrorreflexión de más de 210 mcd/m<sup>2</sup>/lx, donde el valor  $R_L$  en el centro es de aproximadamente 150 mcd/m<sup>2</sup>/lx.

Es posible comprobar que, según este sitio de prueba, la discrepancia entre las lecturas de los instrumentos puede ser importante, ya que la retrorreflexión muestra una gran variación transversal cerca del centro de la marca vial. En general, no es buena idea excluir datos pero, en este caso, es obvio que incluir el número 17 en el análisis podría introducir grandes errores en el resultado.

Justo antes de la prueba interlaboratorio, el instrumento n.º 1 sufrió un pequeño accidente en el que, lamentablemente, quedó destruido. Esto obligó a sustituir este instrumento por un dispositivo utilizado para el desarrollo de filtros. Así, por error, algunos ajustes de los filtros del software estaban mal configurados. Este hecho probablemente causó la gran desviación entre las lecturas del LTL-2000 y el instrumento n.º 1 para las líneas centrales.

En referencia a lo que se ha indicado antes, en el anexo D se muestra un análisis separado donde se han excluido los sitios de prueba 17, 1L y 4L.

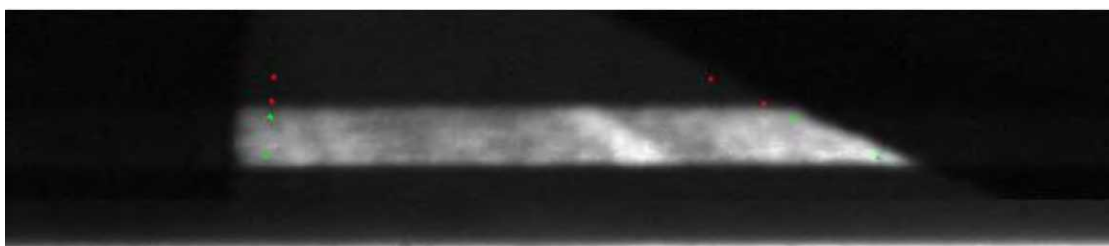


Figura 3 El aspecto de la marca vial en el sitio de prueba n.º 17. La banda brillante, que significa una alta retrorreflexión, está situada hacia la cuneta, a pocos centímetros del centro de la línea delimitadora.

### 3.2 Cálculos estadísticos

A continuación se utiliza la siguiente nomenclatura:

$R_L(X)$	La media $R_L$ de los 21 sitios de prueba utilizando el instrumento X.
$R_L(LTL2000)$	La media $R_L$ de los 21 sitios de prueba utilizando el LTL-2000.
$R_{Lharm}(X)$	La media $R_L$ de los 21 sitios de prueba cuando las distintas lecturas del instrumento móvil X están <i>armonizadas</i> <sup>1</sup> con el $R_L(LTL2000)$ .
$AR_L(X)$	La diferencia media entre $R_L(X)$ y $R_L(LTL2000)$ .
$ \Delta R_{Lharm}(X) $	El valor absoluto de la diferencia media entre las distintas lecturas de $R_{Lharm}(X)$ y $R_L(LTL2000)$ .
$ \Delta R_L(X) $	El valor absoluto de la diferencia media entre las distintas lecturas de $R_L(X)$ y $R_L(LTL2000)$ .
$s_{acc}$	La exactitud (error sistemático) de las mediciones.
$s_{prec}$	La precisión (error aleatorio) de las mediciones.
$s_{unc}$	La incertidumbre (error total de medición) de las mediciones.
$s_{rep}$	La repetibilidad de las mediciones.

<sup>1</sup> es decir, se corrige su error sistemático

Para el instrumento móvil X la exactitud,  $e_{acc}(X)$ , se calcula como

$$e_{acc}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{Li}(X) - R_{Li}(LTL2000))}{n R_{Li}(LTL2000)} \quad (1)$$

donde  $R_{Li}(X)$  es la lectura del instrumento X en el sitio de prueba i,  $R_{Li}(LTL2000)$  es la lectura con el instrumento de mano en el sitio de prueba i y n el número de sitios de prueba.

Además

$$s(X) = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Liharm}(X) - R_{Li}(LTL2000)|}{n R_{Li}(LTL2000)} \quad (2)$$

donde  $R_{Liharm}(X)$  es la retrorreflexión armonizada usando el instrumento X en el sitio de prueba i:

$$R_{Liharm}(X) = R_{Li}(X) - AR_L(X) \quad (3)$$

Por último, el concepto de incertidumbre,  $s_{unc}(X)$  se define como

$$s_{unc}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Li}(X) - R_{Li}(LTL2000)|}{n R_{Li}(LTL2000)} \quad (4)$$

En los sitios de prueba donde se realizó más de una ronda de medición con los instrumentos

móviles, la repetibilidad se calcula como

$$s_{rep}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Lip}(X) - R_{Liq}(X)|}{n R_{Liq}(X)} \quad (5)$$

donde  $R_{Lip}$  y  $R_{Liq}$  hacen referencia a la retrorreflexión de las tandas de medición p y q, respectivamente, en el sitio de prueba i usando el instrumento X Así,  $s_{rep}$ , hace referencia a la repetibilidad de dos tandas de medición. Algunos sitios de prueba se midieron más de dos veces con cada instrumento móvil. En este caso, la repetibilidad se calculó como una media de todas las combinaciones posibles.

Al interpretar los errores de medición, es importante tener en cuenta que la exactitud, la precisión, la incertidumbre y la repetibilidad están relacionadas con la variación de los datos *entre* los sitios de prueba. Además, también hay una variación *en* cada sitio de prueba, lo que en parte es una variación real de la retrorreflexión a lo largo del tramo y, en parte, un error de medición. Sin embargo, no se ha analizado esta variación en el sitio de prueba.

Además, puede destacarse que se han calculado los términos de error lineal. Los términos de error basados en la desviación estándar habrían sido mayores y las desviaciones habrían tenido una mayor influencia sobre los errores de medición estimados. Esto se muestra mediante los valores  $r^2$  en las figuras 4 - 7.

## 4 Resultados

### 4.1 Retrorreflexión medida

La tabla 2 muestra la retrorreflexión media estimada para cada uno de los 21 sitios de prueba.

Tabla 2 La retrorreflexión en 21 sitios de prueba de 200 metros. Media de 1 - 6 tandas de mediciones en un tramo de unos 200 metros.

Sitio de prueba	LTL-2000	Instrumento móvil 1	Instrumento móvil 2	Instrumento móvil 3	Instrumento móvil 4
1	110	120	101	223	157
2	260	254	257	367	293
3	279	251	265	362	254
4	260	363	213	464	327
5	353	314	355	362	348
7	247	229	231	319	239
8	263	238	255	342	254
9	178	172	154	278	183
10	242	210	251	371	293
11	365	286	359	451	359
12	383	292	375	374	383
13	215	230	238	411	321
14	359	325	342	487	390
15	338	341	351	374	406
16	307	303	312	194	325
17	231	207	159	141	239
18	359	345	328	475	399
19	489	512	434	385	477
20	507	539	541	444	581
1L	150	62	148	144	161
4L	419	176	366	405	362

Los sitios de prueba 1L y 4L son líneas discontinuas, mientras que el resto son líneas delimitadoras continuas.

Informe sobre la primera prueba interlaboratorio para reflectómetros móviles, versión final, 11/04/2011

### 4.2 Exactitud (errores sistemáticos)

La tabla 3 muestra la exactitud de los cuatro instrumentos móviles calculada de acuerdo con Eqn. (1).

Tabla 3 La exactitud estimada a partir de mediciones de campo de 21 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con las mediciones de mano usando el LTL-2000.

Instrumento	$R_L$		
LTL-2000	301	-	-
Instr. móv. 1	275	- 26	- 8.4 %
Instr. móv. 2	287	- 13	- 4.8 %
Instr. móv. 3	351	+ 50	+ 23.7 %
Instr. móv. 4	321	+ 21	+ 9.1 %

Como hemos indicado antes, el área de medición de los cuatro tipos de instrumento no es igual. Por lo tanto, los instrumentos 3 y 4 deben medir un valor más alto que el LTL-2000 y el instrumento 2 un valor igual al instrumento de mano. Los resultados del instrumento n.º 1 representan todo el área de la

marca vial y, por lo tanto, pueden ser superiores o inferiores que la lectura de mano, en función de la distribución de  $R_L$  a través de la línea. Todas estas hipótesis coinciden con los resultados, aunque es imposible estimar si el tamaño de las diferencias es correcto.

### 4.3 Precisión (errores aleatorios)

Para hallar la precisión de los instrumentos, los valores  $R_L$  de la tabla 3 están armonizados de acuerdo con Eqn. (3). Esta armonización permite un análisis de la precisión, con independencia de la exactitud. La tabla 4 muestra los errores aleatorios una vez rechazada la desviación sistemática, que estima la precisión de la medición.

Tabla 4 La precisión estimada a partir de mediciones de campo de 21 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con mediciones de mano usando el LTL-2000.

Instrumento	$R_{Lharm}$	$DR_{Lharm}$	
LTL-2000	301	-	-
Instr. móv. 1	301	44	14.8 %
Instr. móv. 2	301	21	7.1 %
Instr. móv. 3	301	72	26.9 %
Instr. móv. 4	301	30	10.8 %

En particular, la precisión del instrumento n.º 3 es deficiente. Vale la pena señalar que los instrumentos 3 y 4 son del mismo tipo y, por lo tanto, deberían tener un funcionamiento similar. Resulta difícil explicar la gran diferencia de precisión entre estos dos instrumentos, pero la experiencia previa nos dice que la cifra del instrumento 3 es demasiado alta.

### 4.4 Incertidumbre

El concepto de "incertidumbre" es el concepto general que incluye tanto la exactitud como la precisión, de acuerdo con Eqn. (4). La tabla 5 muestra la incertidumbre de los cuatro instrumentos móviles.

Tabla 5 La incertidumbre estimada a partir de mediciones de campo de 21 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con las mediciones de mano usando el LTL-2000.

Instrumento			$\epsilon_{unc}$
LTL-2000	301	-	-
Instr. móv. 1	275	44	14.8 %
Instr. móv. 2	287	22	7.4 %
Instr. móv. 3	351	88	35.0 %
Instr. móv. 4	321	32	12.4 %

Parte de la incertidumbre para los instrumentos 1, 3 y 4 puede explicarse mediante la diferencia en el área de medición, como se explica en el capítulo 3. Sin embargo, la incertidumbre del instrumento 3 es muy grande, lo que probablemente se debe a algún fallo o error de manejo

### 4.5 Repetibilidad

La tabla 6 muestra la repetibilidad de los cuatro instrumentos móviles.

Tabla 6 La repetibilidad de los cuatro instrumentos móviles. Media de 1 - 5 repeticiones en ocho sitios de prueba (instr. móv. 1 solo 2).

Instrumento	$\epsilon_{rep}$
Instr. móv. 1	1.8 %
Instr. móv. 2	1.8 %
Instr. móv. 3	2.9 %
Instr. móv. 4	3.3 %

Las cifras de la tabla 6 muestran una buena repetibilidad en los cuatro instrumentos.

## 5 Correlación con las mediciones de mano

Las figuras 4 a 7 muestran la regresión entre, por un lado, las mediciones de mano y, por otro, las mediciones móviles basadas en 21 sitios de prueba. En cada figura se indica el valor  $r^2$ . Este valor puede interpretarse como el porcentaje de la variación total en los datos, que se explica mediante una variación real en la retrorreflexión de las marcas viales. El resto son errores de medición. La raíz cuadrada de  $r^2$  es el coeficiente de correlación.

La figura 4 muestra la línea de regresión entre las lecturas del **instrumento móvil n.º 1** y el LTL-2000.

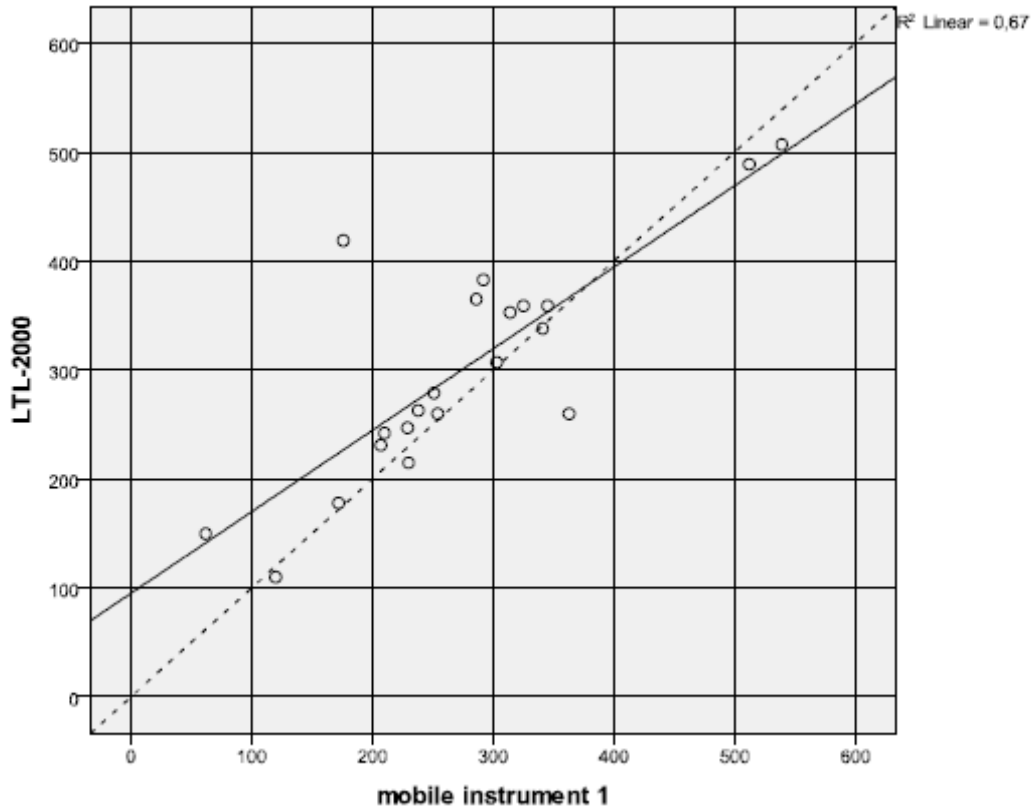


Figura 4 La línea de regresión para el instrumento móvil 1 y LTL-2000 mostrada como la línea continua. La línea discontinua es  $x = y$ .

Como puede verse en la figura 4, hay algunas desviaciones; entre ellas están las dos líneas de carril.  $r^2$  muestra que el 64 % de la variación total de los datos se explica a través de la variación en la retroreflexión de las marcas viales. El resto de la variación, el 36 %, se debe a los errores aleatorios en las mediciones.

La figura 5 muestra la línea de regresión entre las lecturas del **instrumento móvil n.º 2** y el LTL-2000.

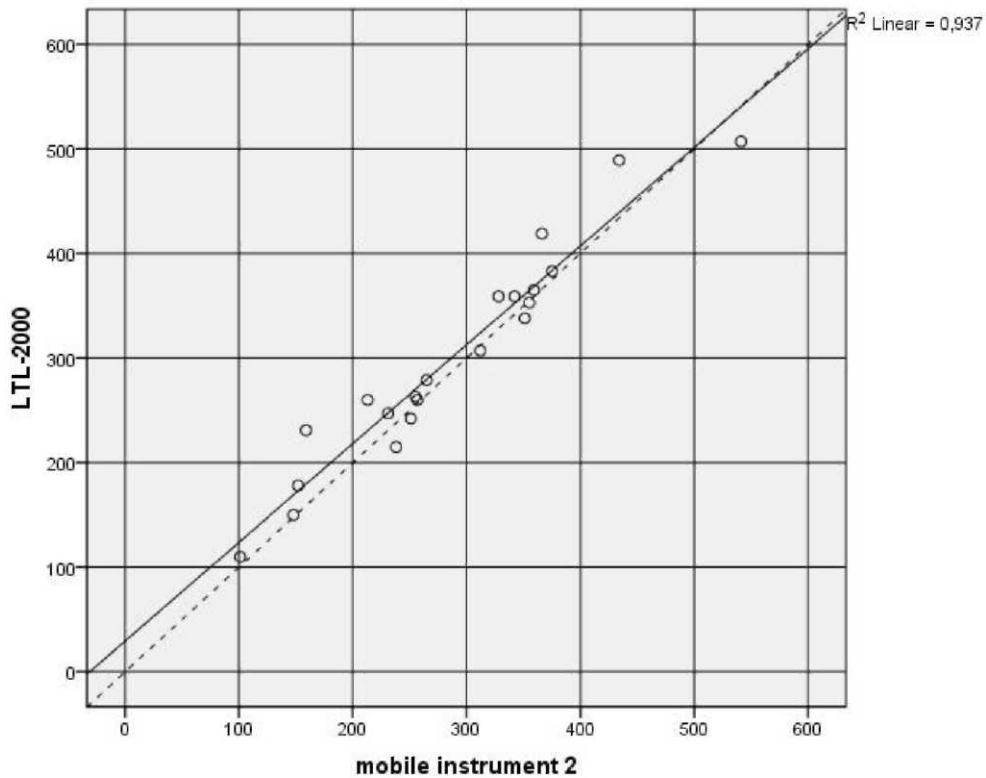


Figura 5 La línea de regresión para el instrumento móvil 2 y LTL-2000 mostrada como la línea continua. La línea discontinua es  $x = y$ .

La figura 5 muestra que la línea de regresión del instrumento 2 está muy cerca de  $x = y$ .  $r^2$  indica que un 6% de la variación total en los datos procede de errores de medición; el resto, un 94 %, es la variación real de la retrorreflexión de las marcas viales entre los 20 sitios de prueba.

La figura 6 muestra la línea de regresión entre las lecturas del **instrumento móvil n.º 3** y el LTL-2000.

Lineal = 0,354

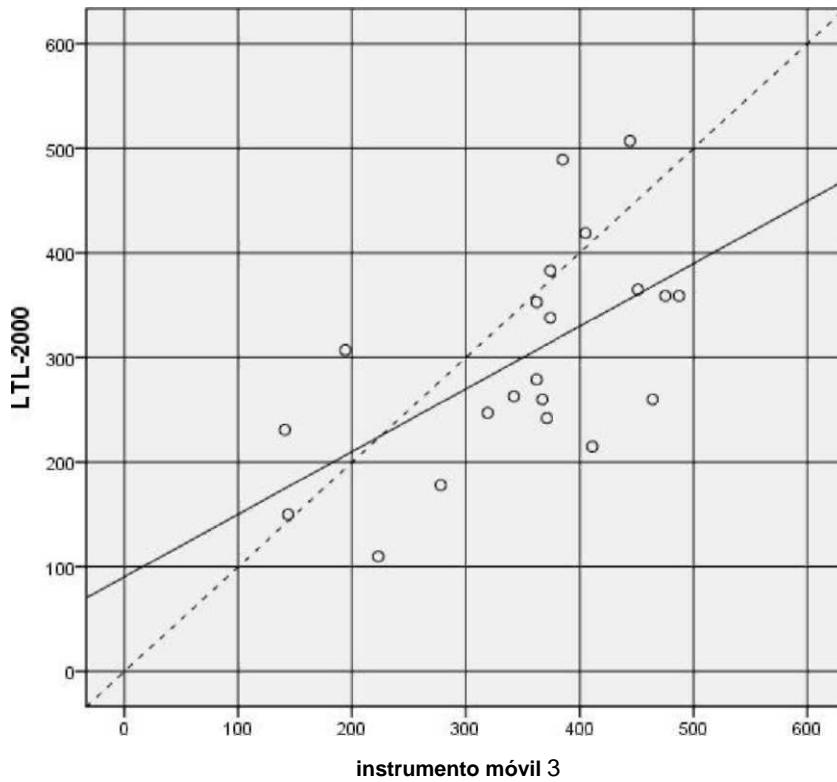


Figura 6 La línea de regresión para el instrumento móvil 3 y LTL-2000 mostrada como la línea continua. La línea discontinua es  $x = y$ .

La figura 6 muestra que tanto los errores sistemáticos como aleatorios son grandes para el instrumento 3. De hecho, la mayor parte de la variación en los datos procede de los errores de medición y solo un 35 % de la variación en la retrorreflexión de las marcas viales.

La figura 7 muestra la línea de regresión entre las lecturas del **instrumento móvil n.º 4** y el LTL-2000.

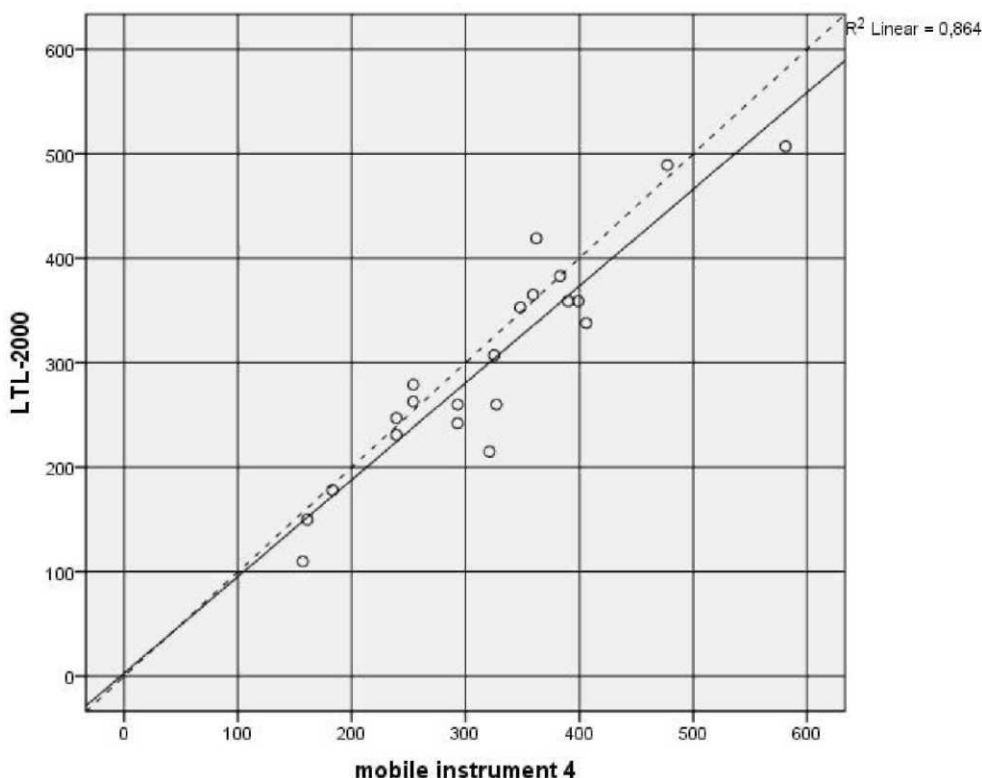


Figura 7 La línea de regresión para el instrumento móvil 4 y LTL-2000 mostrada como la línea continua. La línea discontinua es  $x = y$ .

La figura 7 muestra una elevada correlación entre las lecturas de los dos instrumentos. La discrepancia sistemática de aproximadamente el 10% (véase la tabla 3) puede explicarse, hasta cierto punto, por la diferencia en las áreas de medición.

## 6 Uso de los resultados

El panel de expertos de CEN/TC 226 WG2 debe evaluar las incertidumbres derivadas de este estudio y realizar recomendaciones para la medición móvil, en vista de los métodos usados por los instrumentos participantes, y como se describe en los anexos.

En este momento, se recomienda que los instrumentos móviles estén diseñados para ser fáciles de manejar y resistentes, de modo que se eviten los errores observados en el estudio.

Además, se recomienda seleccionar un solo método de tratar la anchura de las marcas viales, en vista de la falta de uniformidad transversal observada en este estudio.

## Anexo A

### Descripción del LTL-M

#### A1 Introducción al LTL-M

El LTL-M mide el coeficiente de luminancia  $R_L$  retrorreflejada durante la marcha. La geometría de medición es la geometría de 30 m de EN 1436 en una escala de 1:5, lo que significa, por ejemplo, que

la distancia de medición nominal  $D_0$  es de 6 m. Se intercambian las posiciones del detector y la fuente de luz.

La fuente de luz es una lámpara flash de xenón que emite destellos con una duración habitual de 10 a 20 microsegundos. Mediante la óptica apropiada, la lámpara flash ilumina un campo de la carretera que tiene aproximadamente 1 m de largo x 1 m de ancho.

El detector es una cámara digital usada con un tiempo de exposición fijo ajustado normalmente entre 10 y 20 microsegundos.

Los destellos de la lámpara flash y las exposiciones de la cámara están sincronizados. La velocidad actual es de 25 destellos y exposiciones por segundo. Los análisis de software mencionados a continuación se realizan en tiempo real.

Se muestra un campo de la calzada en una parte de la imagen que tiene una anchura de más de 1.000 píxeles y una altura típica de 100 píxeles. Este campo es un poco más ancho que el campo iluminado, pero mucho más largo, y cubre un intervalo de distancia aproximado de 4 a 8 m.

El software apropiado analiza esta parte de la imagen y determina si contiene una marca vial longitudinal. En tal caso, el software determina los márgenes que encierran la superficie de la marca vial y también los posibles comienzos y finales de las marcas viales en las líneas discontinuas. El software también identifica las partes de la superficie de la marca vial que están iluminadas por la lámpara flash. Además, el software determina las distancias reales  $D$  hasta los puntos de la superficie que corresponden a cada uno de los píxeles.

La figura A1 muestra una imagen típica con una línea delimitadora de 30 cm.

Mediante la óptica apropiada, se hace que otra parte de la imagen muestre la propia fuente de luz de forma que represente la distribución de la iluminancia  $E_0$  sobre una superficie vertical a la distancia  $D_0$ . El software usa esta distribución para determinar la iluminancia  $E$  creada por la lámpara flash en los puntos de la superficie de la marca vial mediante  $E = E_0 \times (D_0/D)^2$ . El término  $(D_0/D)^2$  representa la ley de la iluminación.

La figura A1 contiene también una imagen típica de la fuente de luz.



*Figura A1 La parte iluminada de una línea delimitadora de 30 cm (imagen superior) y la lámpara flash (imagen inferior).*

Sobre esta base, el valor  $R_L$  en una ubicación se obtiene mediante:

$$R_L = C_0 \times C \times (P.D)/E$$

donde  $C_0$  es un factor de corrección

$C$  es un factor de calibración

$P$  es el valor del píxel que corresponde a la posición

y  $D$  es un nivel residual de luz diurna.

El resultado se expresa como el valor  $R_L$  medio para un campo en la parte iluminada de la superficie de la marca vial.

Se indican dos de estos campos en la figura A2. El campo superior corresponde a una línea de 5 cm de ancho en el centro de la superficie de la marca vial, mientras que el campo inferior incluye casi todo el ancho de la marca vial.

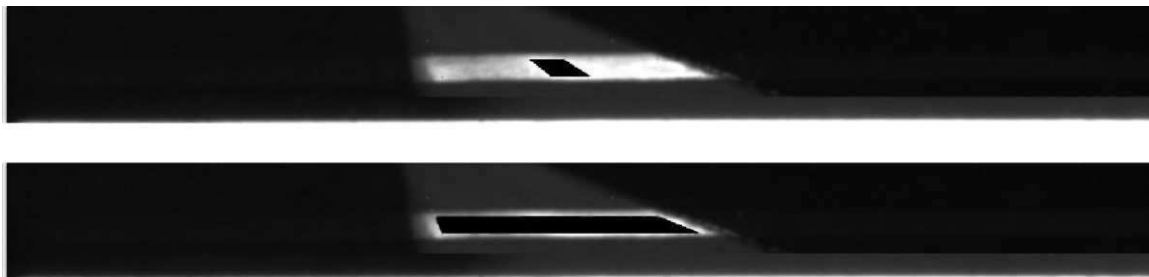


Figura A2 Dos campos para integrar el valor  $R_L$ .

NOTA: Las imágenes son en realidad más anchas de lo que muestran las figuras A1 y A2.

La luminancia retrorreflejada de la superficie de la marca vial domina sobre la luz diurna durante la breve duración del destello. No obstante, a plena luz diurna hay un nivel de luz diurna residual que se determina para un campo sobre una parte de la superficie de la marca vial que no está iluminada por la lámpara flash.

El nivel de luz diurna residual que se usa en la imagen actual es en realidad el que se ha determinado a partir de una imagen anterior, mientras que el nivel determinado a partir de la imagen actual se guarda para usarlo con una imagen posterior. De esta forma, se determina el nivel de luz diurna residual en el punto correcto y justo un poco tiempo antes de usarlo, normalmente 1/25 de segundo antes.

Se garantiza la linealidad y la uniformidad de respuesta de los píxeles de la cámara sobre la base de un procedimiento inicial realizado en condiciones de laboratorio.

El LTL-M, por su diseño y forma de funcionar, garantiza una sensibilidad casi constante sobre la anchura del campo iluminado. Sin embargo, se realiza una calibración general a intervalos para evitar las pequeñas variaciones posibles. Con este objetivo, se orienta el LTL-M para iluminar una superficie blanca uniforme situada a la distancia  $D_0$  y se inicia un software adicional. El software determina y almacena una serie de los factores de corrección  $C_0$  mencionados anteriormente como una media de 100 exposiciones y almacena los valores. El software también obtiene algunas mediciones geométricas que se usan para los análisis de imágenes de la calzada durante la marcha mencionados anteriormente.

El valor del factor de calibración  $C$  mencionado anteriormente se obtiene en un procedimiento de calibración usando un estándar de calibración de uno de los tipos empleados para los retrorreflectómetros de mano LTL 2000, LTL-X o LTL-XL. También pueden usarse otros estándares de calibración. El estándar de calibración se sitúa a la distancia  $D_0$ , el LTL-M se orienta para iluminar la superficie delantera de cerámica del estándar y se inicia un software adicional. Este software determina  $C$  como una media para 100 exposiciones y almacena el valor.

El software usado durante la marcha determina no solo el valor  $R_L$  como se describe anteriormente, sino también:

- la geometría de las marcas viales, incluido el ancho y los espacios entre las líneas discontinuas
- la geometría de medición, incluida la posición de altura del equipo, la distancia de medición y los tres ángulos relacionados con la orientación del equipo en relación con la superficie de la marca vial.

El software obtiene todos los valores mencionados anteriormente para una o dos líneas (por ejemplo, las líneas dobles centrales) simultáneamente.

## **A2 Conformidad con EN 1436**

El LTL-M funciona de conformidad con EN 1436:

- al tener una corrección espectral que permite medir marcas viales tanto blancas como amarillas
- al cumplir la condición de medición estándar en términos de ángulos, aperturas y campo medido
- al tener suficiente intervalo y linealidad
- al obtener valores  $R_L$  que no se ven afectados por la luz ambiental
- al obtener valores  $R_L$  que son resistentes a la inclinación y elevación
- al usar un estándar de calibración con un valor  $R_L$  trazable que también puede calibrarse de forma independiente.

Las inclinaciones y elevaciones son inevitables en condiciones de circulación práctica, pues son causadas por los movimientos del vehículo, la curvatura de la carretera u otros factores. La compensación de los efectos de la ley de iluminación se obtiene de la manera en que se explica en A1. Además, se evitaron los efectos de un factor geométrico inherente en el valor  $R_L$  excluyendo dicho factor geométrico del valor medido. Esto se obtiene a través del intercambio del detector y la fuente de luz.

NOTA 1: Los retrorreflectómetros de mano LTL 2000, LTL-X y LTL-XL proporcionan también este tipo de resistencia. En estos retrorreflectómetros de mano, la resistencia a la distancia se obtiene mediante el uso de óptimas de colimación que crean una distancia de medición virtualmente infinita. La exclusión del factor geométrico del valor medido se obtiene mediante la colocación de los campos de iluminación y medición de forma que el campo iluminado esté incluido dentro del campo medido.

NOTA 2: El factor geométrico es la relación seno/senos, donde  $e$  y  $a$  son los ángulos de iluminación y observación. El valor correcto para la geometría de 30 m es 0,542 y se aplica como un factor.

## **A3 Otros comentarios**

Las diversas características del LTL-M (resistencia a las inclinaciones y elevaciones, realimentación desde la fuente de luz, identificación precisa del campo relevante y compensación precisa de la luz

diurna residual) otorga validez no solo a los valores  $R_L$  medios para el sitio de 50 o 100 m, sino también a los distintos valores  $R_L$  medidos en los lugares.

El valor del factor de calibración  $C$  es estable a lo largo del tiempo gracias a la realimentación desde la lámpara flash. No obstante, es fácil realizar la calibración in situ.

La anchura de campo de más de 1 m, consulte D.1, permite un cómodo guiado del vehículo.

La información sobre la geometría de la medición, consulte D.1, garantiza que es posible mantener la alineación dentro de las tolerancias.

## Anexo B

### Descripción del Ecodyn 30

#### Ecodyn

**Un dispositivo para exámenes diurnos de la visibilidad diurna y nocturna de las marcas viales con una sola pasada continua**



Ecodyn mide continuamente los coeficientes de luminancia retrorreflejada de las marcas viales, además de su contraste diurno y nocturno con el pavimento. Esto ayuda a la autoridad de obras públicas a planificar campañas para la reposición de las

marcas viales, comprobar la calidad de los productos para las mismas y supervisar su desarrollo con el tiempo. De este modo, permite hacer una importante contribución a la mejora de la seguridad vial.

## Principio

El coeficiente de luminancia retrorreflejada de las marcas viales caracteriza su capacidad para la retrodispersión de la luz de los faros de los vehículos hasta el conductor. Se denomina RL y se expresa en  $\text{mcd/m}^3 \cdot \text{lx}$ . Para medirlo, Ecodyn emite una luz blanca de frecuencia modulada y recibe el haz luminoso retrorreflejado, superpuesto al flujo de la iluminación ambiental. El procesamiento de señal apropiado permite separar los dos tipos de luz y calcular los coeficientes de RL, además del contraste diurno y nocturno de las marcas con el pavimento.

La geometría de medición cumple la norma europea dominante NF EN 1436, es decir, un ángulo de  $1,24^\circ$  con el plano de la superficie de la calzada para la transmisión y un ángulo de  $2,29^\circ$  para recepción. Simula la visibilidad de una marca vial para el conductor de un vehículo que la vea a una distancia de 30 m.

## Descripción

Ecodyn se instala en un vehículo monovolumen equipado especialmente. Incluye una caja de medición fijada al exterior del vehículo, una caja electrónica para enviar y recibir las señales, y un microordenador para la adquisición y procesamiento de datos.

La adquisición de datos (lecturas cada  $\sim 40$  cm) no depende de la velocidad del vehículo. El conductor controla la posición del vehículo en relación con las marcas viales utilizando un gráfico de barras situado en el salpicadero del vehículo.

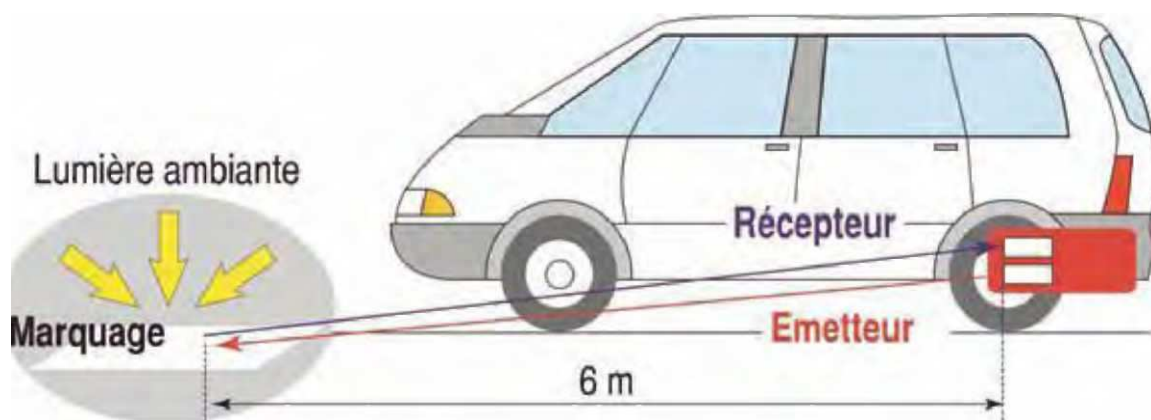


Diagrama del principio

(Lumière ambiante = luz ambiental; Marquage = marcas; Récepteur = receptor; Emetteur = transmisor)

## Características

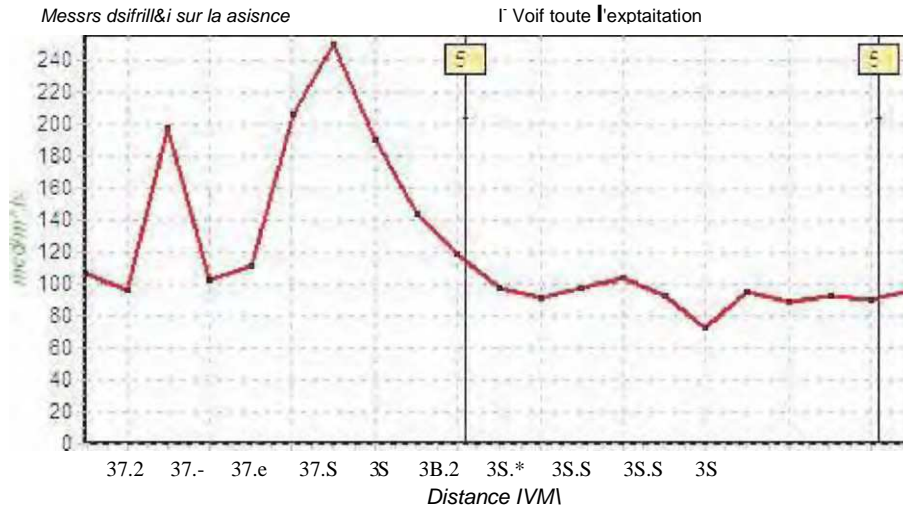
### Características metrológicas

- Ángulo de transmisión ("entrada"):  $1.24^\circ$ .
- Ángulo de recepción ("observación"):  $2.29^\circ$ .
- Distancia de iluminación media: 6 m.
- Anchura del área iluminada = 0,5 m.

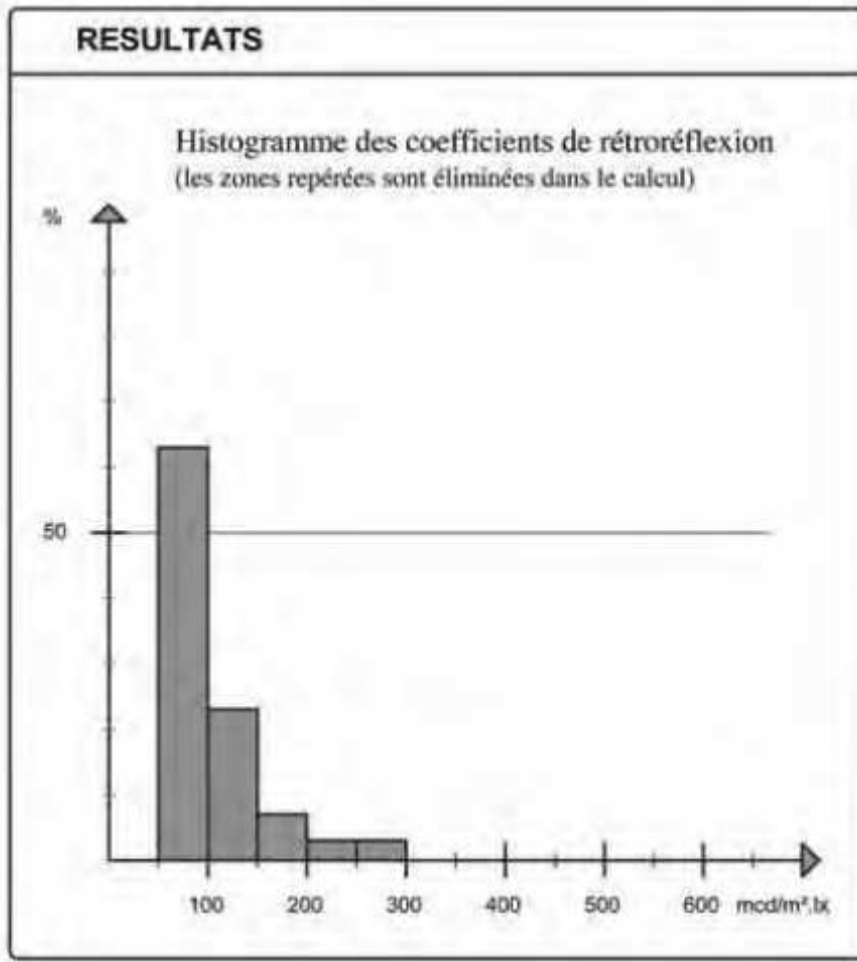
- Longitud del área observada = 1 m; anchura del área observada =

0,5 m. *Características mecánicas y eléctricas*

- Vehículo anfitrión: vehículo monovolumen climatizado (con una suspensión rígida).
- Caja de medición: longitud = 0,75 m, anchura = 0,21 m, altura = 0,42 m.
- Alimentación de corriente desde la batería de 12 V del vehículo.
- Fuente de luz: lámpara halógena de 75 W con una duración de 3.000 h.
- Detección del haz luminoso recibido por la matriz lineal de fotodiodos.
- Recepción en 14 vías.



Visualización de una franja de marcas (Mesure detaillee sur la distance = Valores medidos frente a distancia; Voir toute l'exploitation ... = Ver todo el intervalo de datos...)



(RESULTATS = RESULTADOS; Histogramme ...= Histograma de coeficientes de retrorreflexión (los lugares del área no se tienen en cuenta en el cálculo)

### Condiciones de funcionamiento y limitaciones de uso

- Marcas limpias y secas, sin rastro de sal.
- Condiciones meteorológicas: tiempo seco,  $t^{\circ} > 5^{\circ}\text{C}$ .
- Velocidad: de 0 a 110 km/h.
- Integrado con el flujo del tráfico, sin protección especial excepto en carreteras con 2 x 2 carriles (mediciones en las líneas del borde izquierdo).

### Aplicaciones

- Medición continua de la visibilidad diurna y nocturna de las marcas viales (lecturas cada ~ 40 cm).
- Representación de los resultados como valores promedios de zonas con una longitud que debe definir el operador (100 m, 500 m ...).
- El intervalo de medición se extiende desde unos pocos  $\text{mcd/m}^2.\text{lx}$  hasta unos  $2.000 \text{mcd/m}^2.\text{lx}$ .

### Expresión de los resultados

Además de representaciones visuales en forma de listas y gráficos, los resultados pueden incorporarse a un banco de datos y presentarse en forma de mapas o diagramas de rutas.



Los equipos mlpc® para examinar el estado de la calzada están diseñados por LCPC y los Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE).

Son distribuidos por Vectra, la única empresa con licencia de LCPC para su fabricación y comercialización.

**Sede central:** 34, rue de Panicale - 78320 La Verriere (Francia)

Tel.: + 33 1 30 66 01 77 - Fax: + 33 1 30 62 90 06 - Correo electrónico: [vecetra@vecetra.fr](mailto:vecetra@vecetra.fr)

**Centre d'Etudes et de Construction**

ZI route de Tours - 36500 Buzangais (Francia)

La información incluida en esta página carece de valor contractual; el LCPC y Vectra se reservan el derecho a modificar ciertos componentes y características para mantenerse al día de los avances tecnológicos.

## Anexo C

### Descripción del Zehntner ZDR 6020

El ZDR 6020 mide la visibilidad nocturna de las marcas viales ( $R_L$ ) en condiciones de luz diurna. La geometría de medición cumple totalmente EN1436 y ASTM 1710. Es posible medir todos los sistemas de marcas viales populares. Además, el sistema ZDR 6020 está aprobado también por StrausZert, un instituto de pruebas acreditado. El dispositivo está también calibrado con un estándar trazable.

El área de medición está iluminada mediante una lámpara halógena estabilizada que proyecta un campo sobre la carretera que está a 6 m por delante del cabezal de medición.

El detector consta de 16 V(X) sensores adaptados que miden la luz retrorreflejada sobre un área de medición con una anchura de 500 mm y una longitud de 1.000 mm. Como el área iluminada es más grande que el área de medición, el sistema es prácticamente inmune frente a las inclinaciones y elevaciones provocadas por el vehículo. La luz diurna y dispersa se elimina mediante un sistema

derivado a partir del principio de lock-in. Todos los sensores se alinean en nuestro laboratorio mediante un procedimiento inicial para obtener una linealidad perfecta.

Se realiza una calibración dinámica a intervalos periódicos. La calibración dinámica ofrece la ventaja de que el sistema de medición ZDR 6020 se calibra en las condiciones de medición. En el modo de medición dinámica, el sistema se calibra con un estándar de calibración que fue medido antes con un dispositivo de mano. No obstante, si no hay posibilidad de realizar una calibración dinámica, también puede realizarse una calibración estática en parado.

En el modo de medición se realizarán 600 mediciones únicas por segundo. Esta adquisición de datos a alta velocidad ofrece la posibilidad de medir también en condiciones de iluminación que cambian con rapidez, como en callejones. Los procesadores de señal digital analizan la señal de cada sensor en tiempo real. El software calcula la anchura de la marca medida para adaptar los filtros de software para calcular un valor  $R_L$  medio a partir de todo el ancho de la marca de la calzada. Además, el software también detecta vacíos y marcas de pavimento reflectante elevadas (RRPM) para calcular un valor  $R_L$  solo a partir de las marcas de la calzada. Además, un algoritmo de autodiagnóstico se asegura de que el sistema esté siempre en buen estado.

La rápida adquisición de datos, en combinación con un gran campo de medición, ofrece la ventaja de que el vehículo de medición puede circular hasta a 120 km/h.

En función de las necesidades del cliente, el intervalo donde se almacena un  $R_L$  medio puede adaptarse manualmente en el software, normalmente es un intervalo de 50 m pero también puede ajustarse continuamente hasta 10 m.

## Anexo D

### Resultados con los sitios de prueba 17, 1L y 4L excluidos

Las tablas D2 - D6 muestran las tablas correspondientes a las tablas 2 - 6, pero con los sitios de prueba número 17, 1L y 4L excluidos.

*Tabla D2 La retrorreflexión en 18 sitios de prueba de 200 metros. Media de 1 - 6 tandas de mediciones en tramos de unos 200 metros.*

Sitio de prueba	LTL-2000	Instrumento móvil 1	Instrumento móvil 2	Instrumento móvil 3	Instrumento móvil 4
1	110	120	101	223	157
2	260	254	257	367	293
3	279	251	265	362	254
4	260	363	213	464	327
6	353	314	355	362	348
7	247	229	231	319	239
8	263	238	255	342	254
9	178	172	154	278	183
10	242	210	251	371	293
11	365	286	359	451	359
12	383	292	375	374	383
13	215	230	238	411	321
14	359	325	342	487	390
15	338	341	351	374	406
16	307	303	312	194	325
18	359	345	328	475	399
19	489	512	434	385	477

20	507	539	541	444	581
----	-----	-----	-----	-----	-----

*Tabla D3 La exactitud estimada a partir de mediciones de campo de 18 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con las mediciones de mano usando el LTL-2000.*

Instrumento	$R_L$		
LTL-2000	306	-	-
Instr. móv. 1	296	- 11	- 2.7 %
Instr. móv. 2	298	- 8	- 3.1 %
Instr. móv. 3	371	+ 65	+ 30.2 %
Instr. móv. 4	333	+ 26	+ 10.8 %

*Tabla D4 La precisión estimada a partir de mediciones de campo de 18 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con mediciones de mano usando el LTL-2000.*

Instrumento	$R_{Lharm}$		
LTL-2000	306	-	-
Instr. móv. 1	306	30	9.8 %
Instr. móv. 2	306	17	5.7 %
Instr. móv. 3	306	69	24.6 %
Instr. móv. 4	306	30	11.2 %

*Tabla D5 La incertidumbre estimada a partir de mediciones de campo de 18 sitios de prueba. Cuatro instrumentos móviles comparados con las mediciones de mano usando el LTL-2000.*

Instrumento	$R_L$		$\epsilon_{unc}$
LTL-2000	304	-	-
Instr. móv. 1	271	45	10.2 %
Instr. móv. 2	294	19	6.1 %
Instr. móv. 3	362	88	38.3 %
Instr. móv. 4	326	34	13.1 %

## Anexo E

### Lugares de medición

1. Punto de medición MPI: Tervurenlaan en Tervuren, línea delimitadora



2. Measurement point MP11: Tervurenlaan in Tervuren, centre line



3. Measurement point MP2: Meerdaalboslaan in Leuven, edge line



4. 4. Punto de medición MP3: N227b-Steenokkerzeel, línea



5. Measurement point MP4L: N21 – Nieuwe Haachtse Steenweg – Machelen, centre line



6. Measurement point MP4: N21 – Nieuwe Haachtse Steenweg – Machelen, edge line



7. 7. Punto de medición MP5: Brusselsesteenweg-Zemst, línea



8. Measurement point MP6: N227 Mechelsesteenweg-Wezembeek-Oppem, edge line



9. Measurement point MP7: N227 Tervuursesteenweg-Hofstade, edge line



10. Punto de medición MP8: N270 Rubenslaan-Zemst, línea



11. Measurement point MP9: N25 Naamssteenweg-Oud-Heverlee, edge line



12. Measurement point MP10: E40-Hoegaarden, edge line



13. Punto de medición MP11: E40-Oud-Heverlee, línea



14. Measurement point MP12: E40-Bierbeek, edge line



15. Measurement point MP13: E314-Leuven, edge line



16. Punto de medición MP14: E19-Vilvoorde, línea



17. Measurement point MP15: E19-Zemst, edge line



18. Measurement point MP16: E19-Vilvoorde, edge line



19. Punto de medición MP17: E19-Machelen, línea



20. Measurement point MP18: Haachtsesteenweg-Kampenhout, edge line



21. Measurement point MP19: E19-Mechelen, edge line



22. Punto de medición MP20: entrada E19-Mechelen, línea delimitadora

