

Fiabilidad de las medidas del espesor de las capas de pavimentos de carreteras mediante georradar

JORGE MUÑOZ SANZ (*)

RESUMEN En este trabajo se describe el equipo de georradar del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. Con este equipo se han tomado medidas de espesores de más de 4000 km de carril de carreteras de la Red Estatal. Con el fin de comprobar la fiabilidad del georradar, se han efectuado medidas de espesores en el tramo experimental de Carabias de la carretera N-I y se han comparado con los datos obtenidos mediante testigos extraídos del firme. El pavimento de este tramo comprende diversas secciones estructurales de mezcla bituminosa. Además de indicar las posibilidades del equipo y verificar la fiabilidad de las medidas del espesor de las capas, se señalan las causas que originan los posibles errores, normalmente por un procesamiento de datos inadecuado, y se ofrece una solución sencilla que reduce el error de medida en segunda capa.

RELIABILITY OF MEASUREMENTS OF PAVEMENT LAYERS THICKNESS BY GROUND PENETRATING RADAR

ABSTRACT *This paper describes the ground penetrating radar system used by the Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. This system has been used for measuring layer thickness over 4000 km of the Spanish National Road Network. Measurements have been obtained over different structural sections (asphalt mix) in Carabias (N-I), to verify the reliability of this equipment by comparing with core measurements. In addition, an inappropriate data processing is pointed out as cause of error. A very simple but effective solution is proposed to reduce the error in measurements over the second layer of asphalt mix pavements.*

Palabras clave: Georradar; Ensayos no-destructivos; Software de procesamiento automático; Espesor de capas de pavimento.

1. INTRODUCCIÓN

El georradar empleado en la medida de los espesores de las capas que componen el firme de las carreteras es una modificación de los radares de penetración de suelos utilizados en los trabajos de Geofísica.

En 1995, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) adquirió un equipo para medir espesores; con él se han auscultado más de 4000 km de carreteras de la Red Estatal por encargo de la Dirección General de Carreteras.

Las medidas automáticas de espesor, sin toma de testigos (auscultación no destructiva), a velocidades compatibles con las del tráfico, pueden considerarse como suficientemente fiables para la primera capa detectada; sin embargo, para las capas más profundas detectadas, las medidas automáticas no lo son.

En este artículo, se presenta una serie de medidas de espesor correspondientes a la segunda capa del pavimento y se evalúan los errores obtenidos con el equipo de georradar. Finalmente se propone una solución de tipo práctico, que reduce el error obtenido en el post-procesado, con objeto de obviar las múltiples dificultades y errores que provocan las diferentes hipótesis de cálculo, cuando no se dispone de testigos.

2. EQUIPO UTILIZADO

El equipo dispone de un sistema de georradar modelo SIR-10H de GSSI. Este sistema está dotado de un par de antenas biestáticas TEM de tipo bocina, para cada una de las rodadas.

En cada par de antenas, una de ellas emite impulsos senoidales con amplitud de 10 V y con frecuencia central de 1 GHz; la otra antena recibe los ecos en una banda de frecuencias comprendida entre 0 y 4 GHz, con un nivel de ruido teórico inferior a 1 mV. Ambas antenas no necesitan estar en contacto con el pavimento y se suelen situar a unos 45 cm de altura sobre la superficie de la capa de rodadura (fig.1).

(*) Director del Programa de Materiales Básicos. Licenciado en Ciencias Físicas. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. Ministerio de Fomento.

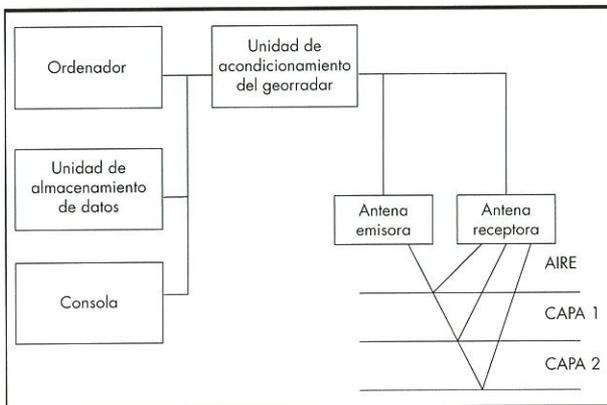


FIGURA 1. Diagrama de bloques del georradar.



FIGURA 2. Equipo de georradar.

El equipo va montado sobre un vehículo (fig. 2). En la auscultación, la velocidad de desplazamiento puede llegar hasta 80 km/h, midiendo en las dos rodadas del carril, tomando una medida de espesores cada metro recorrido y registrando la distancia al origen, las coordenadas GPS y las marcas de eventos que decida el usuario.

Este equipo permite detectar el despegue progresivo de las capas del pavimento bajo ciertas condiciones, la formación de huecos y la evolución de la humedad.

La profundidad de exploración depende de los materiales que componen el firme; pudiendo estimarse, en el caso de firmes flexibles, alrededor de 70 cm; en cualquier caso, el espesor de las capas a detectar debe ser como mínimo de unos 5 cm.

El software de post-procesamiento utilizado ha sido RADAN, V. 1.4 de GSSI.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Las medidas se han efectuado en el tramo experimental de Carabias de la Autovía N-I (pk 128,500 a 132,000) que tiene dos calzadas con dos carriles/calzada. El tramo está constituido por 12 secciones en cada una de las dos calzadas y el pavimento está constituido por mezcla bituminosa con diversas características (espesor, fórmula de trabajo, áridos, densidad, contenido de ligante, etc.).

Para este estudio se han seleccionado 10 secciones de firme de estructura diferente; cada sección tiene una longitud próxima a 300 m.

En cada sección, se han extraído varios testigos del firme y se han medido los espesores de las diferentes capas; estas medidas se han utilizado como valores de referencia.

La auscultación con el georradar se ha hecho, en las dos calzadas, el mismo día y con el mismo operador, a una velocidad media de 80 km/h. El número de pasadas se ha restringido a tres para interferir lo menos posible con el tráfico del carril rápido.

Los valores de velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas a través de las capas del firme, adoptados en el procesamiento de los datos, son calculados de forma automática; las constantes dieléctricas se evalúan en función de las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas.

Las antenas emisoras están orientadas para radiar los impulsos hacia el interior del firme, perpendicularmente a la superficie del pavimento. La detección de las interfaces entre capas se obtiene a partir de las sucesivas señales correspondientes a las reflexiones de los impulsos, originados en esas interfaces y captados por las antenas receptoras du-

rante un intervalo de 20 ns; para ello es necesario que las constantes dieléctricas de las capas adyacentes sean distintas.

El estudio de las ondas reflejadas permite fijar los intervalos de tiempo entre ecos y si se conoce la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en las diferentes capas, o su constante dieléctrica, se puede obtener el espesor de cada capa.

En la medida de los espesores de las capas, el problema que se plantea es cómo conocer la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en cada capa, sin necesidad de recurrir a la toma de testigos.

Es cierto que el número de testigos necesario para obtener espesores fiables disminuye drásticamente con el uso del georradar (dos o tres por tramo homogéneo).

Para obviar, al menos en parte, la toma de testigos, se ha recurrido al uso de grupos de antenas acopladas al pavimento, una emisora y varias receptoras, de forma que los caminos recorridos en una misma capa por las ondas sean conocidos y de ahí obtener la velocidad [1]. Pero es una medida con contacto antena-pavimento, que reduce mucho la velocidad de exploración e interfiere con el tráfico. La experiencia de medidas con una antena emisora y dos receptoras, montadas al aire y por tanto sin contacto antena-pavimento, no ha producido, al menos con nuestro equipo, resultados fiables.

3.1. DETECCIÓN DE LA PRIMERA CAPA

La medida del espesor de la capa superior del pavimento, si es detectada por el georradar como primera capa, se puede obtener de forma automática, de acuerdo con las fórmulas (1) y (2)

$$\epsilon_a = \left(\frac{A_m + A_a}{A_m - A_a} \right)^2 \quad (1)$$

siendo

ϵ_a = Constante dieléctrica relativa de la capa de mezcla bituminosa

A_m, A_a = Amplitudes de los picos de reflexión correspondientes a la placa metálica de calibración (onda incidente) y a la superficie del pavimento.

$$v_a = \frac{c}{\epsilon_a} \quad (2)$$

siendo

v_a = Velocidad de propagación de la onda en la capa de mezcla bituminosa.

c = Velocidad de la luz en el aire.

En la figura 3 se puede observar la correlación entre los espesores obtenidos a partir de los testigos y de las medidas con georradar. En el gráfico, se advierte el aumento de la dispersión de las medidas con el aumento de espesor de la primera capa.

El error cuadrático medio de los espesores obtenidos con relación a los valores de referencia (testigos) ha sido inferior al 5 % [2].

Una aplicación interesante de este equipo es su utilización para testificar el espesor de las capas de mezcla bituminosa, al acabar de extenderlas en obra, de forma automática y suficientemente exacta, con una técnica no-destructiva, rápida y de bajo coste.

3.2. DETECCIÓN DE LA SEGUNDA CAPA

Si el georradar ha detectado la primera capa, la detección de la segunda presenta una serie de dificultades que deben tenerse muy en cuenta.

En el gráfico de la figura 4 se presentan los valores de una de las 10 secciones.

Al trabajar con el programa, en forma automática [3], la constante dieléctrica de la segunda capa se calcula aplicando las fórmulas (3) y (4):

$$\epsilon_b = \epsilon_a \left[\frac{1 - \left(\frac{A_a}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{A_b}{A_m} \right)^2}{1 - \left(\frac{A_a}{A_m} \right)^2 - \left(\frac{A_b}{A_m} \right)^2} \right]^2 \quad (3)$$

siendo

ϵ_a = Constantes dieléctricas de las capas de mezcla bituminosa

A_m, A_a, A_b = Amplitudes de los picos de reflexión correspondientes a la placa metálica de calibración (onda incidente), a la superficie del pavimento y a la interfaz de las capas primera y segunda.

$$v_b = \frac{c}{\epsilon_b} \quad (4)$$

siendo

v_b = Velocidad de propagación de la onda en la segunda capa.

c = Velocidad de la luz en el aire

En las medidas de espesores con georradar se observa que, para las capas inferiores a la primera, se incrementa el error de exactitud a medida que aumenta el número de capas y el espesor de las mismas.

3.2.1 Pérdidas energéticas de los ecos

En la propagación de las ondas a través de las capas de mezcla bituminosa, las pérdidas energéticas se deben a diversos fenómenos que dependen del propio georradar y del medio en que se propagan las ondas.

Si se optara por el cálculo de las pérdidas, la cantidad de factores que influyen en ellas, en mayor o menor grado, hacen muy difícil un tratamiento analítico. Entre esos factores están la atenuación, las reflexiones múltiples, la dispersión de frecuencias, la presencia de humedad, etc.

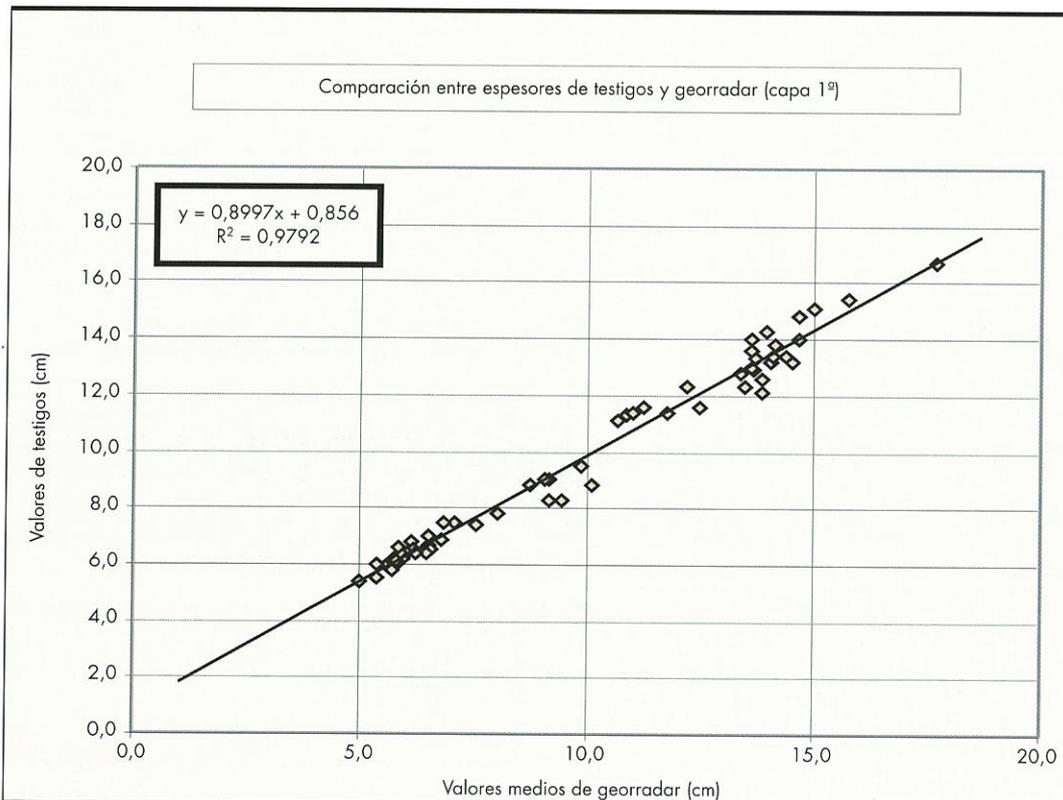


FIGURA 3. Correlación entre medidas de la 1ª capa.

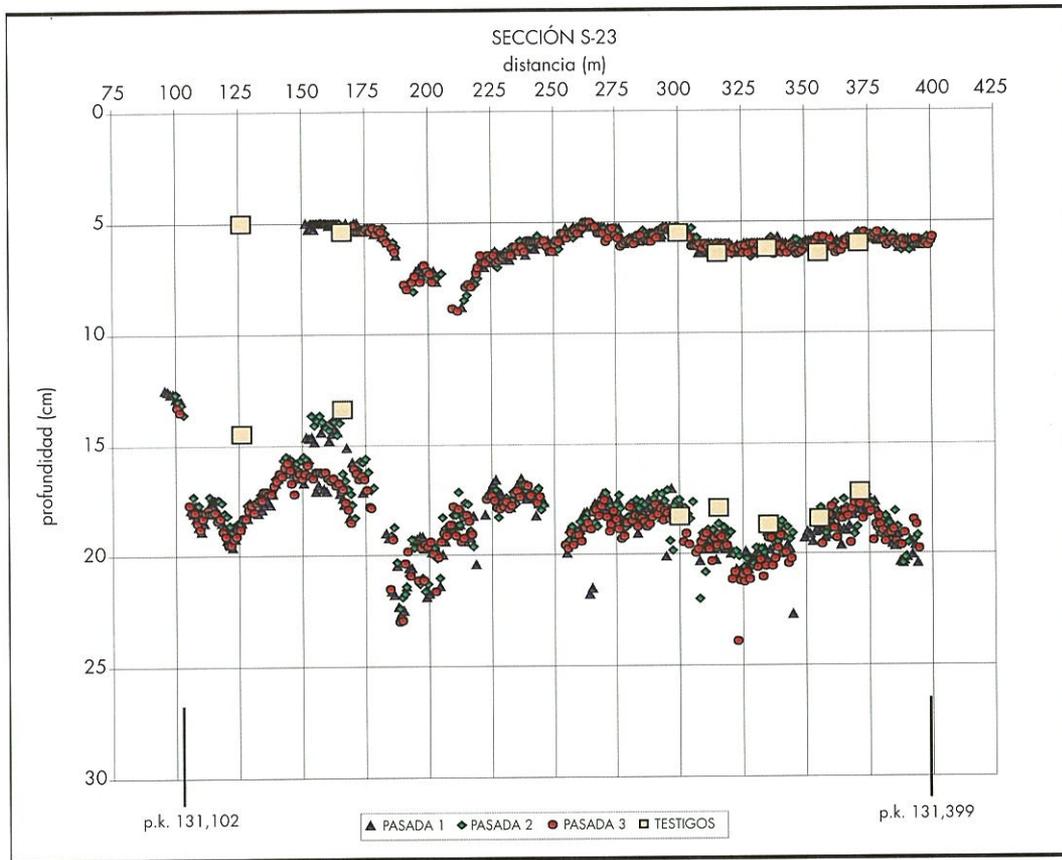


FIGURA 4. Detección de dos capas.

El problema se agravaría al intervenir en las fórmulas de cálculo de algunas de las pérdidas (acoplo en transmisión y atenuaciones) las propias constantes dieléctricas del medio que procederían entonces de una estimación. Por ejemplo, para calcular las pérdidas por atenuación la fórmula de cálculo sería (5):

$$P_a = 8.686R2\pi f \frac{\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r}{2} \{ 1 + tg^2\delta - 1 \} \quad (5)$$

siendo

f : frecuencia

μ_0 : permeabilidad magnética del vacío

μ_r : permeabilidad magnética relativa del medio

ϵ_0 : permitividad absoluta del aire (aprox. del vacío)

ϵ_r : permitividad relativa del medio (capa de mezcla)

$tg\delta$: pérdida tangente del medio (relación entre parte real e imaginaria de ϵ_r)

Daniels [4] ha estimado las pérdidas de energía en la propagación de las ondas electromagnéticas para una antena similar a la utilizada por este equipo situada a 1 m de altura sobre el suelo. En nuestro caso, para un pavimento de mezcla bituminosa, antenas de 1 GHz, distancia antena-pavimento de 0,5 m, considerando dos capas superpuestas de mezcla bituminosa de 10 cm con una atenuación media de 25 dB/m, se pueden estimar las pérdidas indicadas en la tabla 1.

La pérdida total estimada es de 47 dB, por lo que el valor de la amplitud de la señal recibida será de 44 mV. Esto nos

indica que, aunque el cálculo no ofrece una solución adecuada, permite indicar que la relación señal-ruido en la detección de la segunda capa es suficiente.

3.2.2. Resultados obtenidos con el procesamiento automático

En la tabla 2 se presentan los valores de las medidas de espesor correspondientes a testigos y al georradar.

Al observar los datos y los gráficos, se pueden hacer dos consideraciones:

- 1) Se produce un sesgo que hace que el georradar, trabajando de forma automática, dé espesores mayores de los reales
- 2) Al aumentar el número de capas, la detección de las interfaces se hace menos nítida (fig. 5). Esto también se debe a las características estructurales del propio firme.

FACTOR DE PÉRDIDA	dB
Eficiencia de antena (par TEM)	4
Acoplo entre antenas emisora y receptora	2
Aire entre antena y pavimento (emisión)	4
Aire entre pavimento y antena (recepción)	2
Dispersión de frecuencias (spreading)	20
Atenuación	10
Reflexiones múltiples (scattering)	5

TABLA 1. Pérdidas en la señal reflejada.

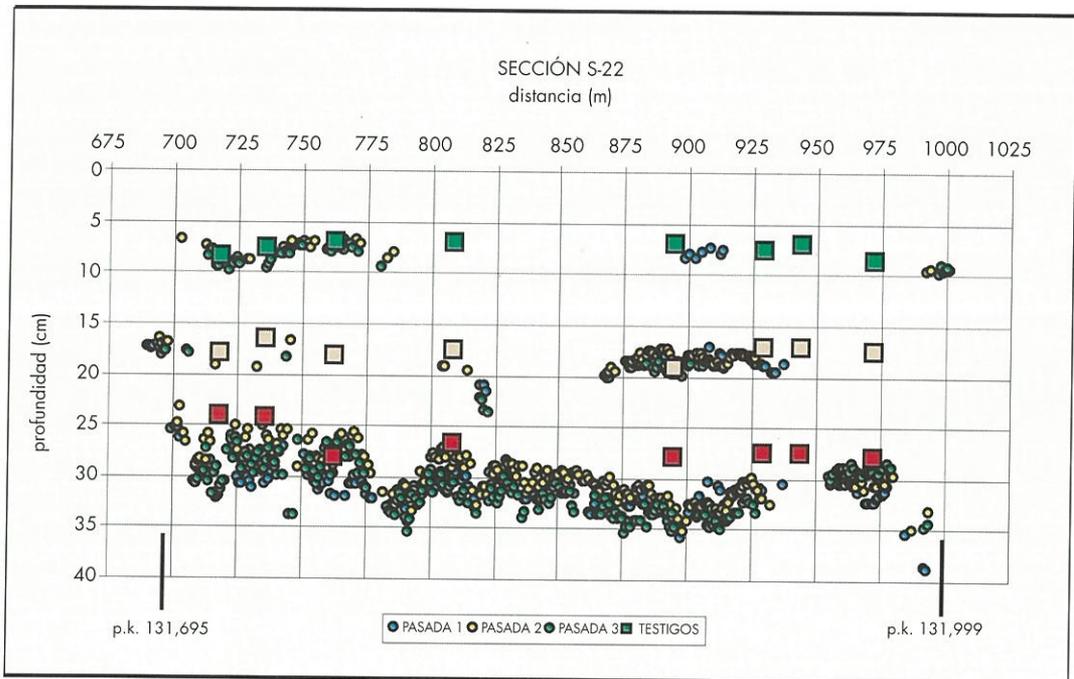


FIGURA 5. Pérdida de nitidez en las interfaces al aumentar el número de capas.

En ensayos posteriores se comprueba que, aplicando la corrección correspondiente a la recta de regresión (fig.6) se reduce el error del 15 % al 8 %. La corrección empleada ha sido:

$$Z = 0.84 + 1.06Z_g$$

siendo

Z = Profundidad corregida de la segunda capa en cm

Z_g = Profundidad de la segunda capa obtenida con el georradar en cm.

Por tanto, aunque pudiera parecer un método muy sencillo, produce resultados comparables a otros más refinados.

Por ejemplo, si tenemos en cuenta los valores obtenidos por Wimsat [5], para mezclas las bituminosas que denomina *normales* (no porosas), los valores de la velocidad de propagación de las ondas están en el rango de 11,5 a 13,5 cm/ns; por tanto, el error cometido al elegir la velocidad media de este rango sería también del orden del 8% lo que concuerda con los valores obtenidos en este trabajo. La ventaja del método propuesto sobre el de Wimsat es que, aceptando esta última estimación, permanece la duda de si la mezcla a estudiar se ajusta o no a ese rango de valores.

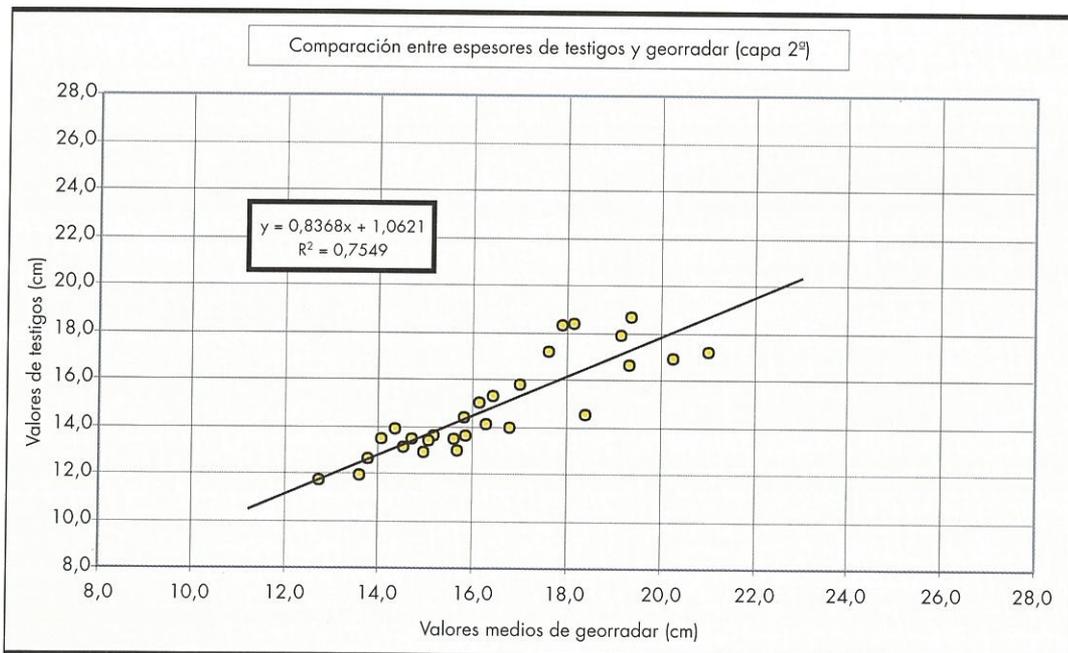


FIGURA 6. Correlación entre las medidas de la 2ª capa.

Sección	Profundidades de la capa 2ª (cm)				Media (cm)	Desv. Tip. (cm)	Error sistemático		
	Testigos	z ₁	z ₂	z ₃			z	s	C.V. (%)
S-13	13,4	14,85	15,4	14,89	15,05	0,307	2,04	1,65	12,289
	13,5	14,26	15,2	14,6	14,69	0,476	3,24	1,19	8,790
	13,6	14,59	16,3	14,64	15,18	0,973	6,41	1,58	11,593
	13,5	15,24	16,1	15,41	15,58	0,455	2,92	2,08	15,432
	15	16	16,57	15,8	16,12	0,400	2,48	1,12	7,489
S-16	11,7	12,8	12,7	12,7	12,73	0,058	0,45	1,03	8,832
	13,6	15,9	15,71	15,9	15,84	0,110	0,69	2,24	16,446
	11,9	13,46	13,56	13,8	13,61	0,175	1,28	1,71	14,342
	15,3	16,5	16,61	16,2	16,44	0,212	1,29	1,14	7,429
	13,5	13,98	14,53	13,65	14,05	0,445	3,16	0,55	4,099
S-23	14,5	18,5	18,4	18,3	18,40	0,100	0,54	3,90	26,897
	13,4	15,15	13,98	16,04	15,06	1,033	6,86	1,66	12,363
	18,3	17,97	17,52	18,18	17,89	0,337	1,88	-0,41	-2,240
	17,9	19,69	18,62	19,11	19,14	0,536	2,80	1,24	6,927
	18,7	19,81	19	19,27	19,36	0,412	2,13	0,66	3,529
	18,4	18,65	17,92	17,89	18,15	0,430	2,37	-0,25	-1,341
	17,2	17,72	17,38	17,76	17,62	0,209	1,19	0,42	2,442
S-24	17,2	20,37	22	20,7	21,02	0,862	4,10	3,82	22,229
	14,4	16,17	15,49	15,74	15,80	0,344	2,18	1,40	9,722
	14,1	16,66	15,96	16,26	16,29	0,351	2,16	2,19	15,556
S-7	15,8	17,1	17,7	16,22	17,01	0,744	4,38	1,21	7,637
	16,9	20	20,3	20,5	20,27	0,252	1,24	3,37	19,921
	16,6	19,1	19,6	19,3	19,33	0,252	1,30	2,73	16,466
S-6	14	16,9	16,7	16,74	16,78	0,106	0,63	2,78	19,857
	13	15,5	15,8	15,7	15,67	0,153	0,98	2,67	20,513
	13,1	15	14,51	14,06	14,52	0,470	3,24	1,42	10,865
	14,4	15,7	16,2	15,5	15,80	0,361	2,28	1,40	9,722
S-4	13,9	14,2	14,1	14,7	14,33	0,321	2,24	0,43	3,118
	12,9	14,8	15,4	14,7	14,97	0,379	2,53	2,07	16,021
	12,6	13,69	13,93	13,68	13,77	0,142	1,03	1,17	9,259

TABLA 2. Datos de profundidad de la 2ª capa.

4. CONCLUSIONES

- Si el georradar detecta dos capas, el cálculo automático del espesor de la primera capa produce un error cuadrático medio inferior al 5%; sin embargo, este mismo tipo de cálculo aplicado a la segunda capa produce un error del 15%.
- Este último error se puede reducir, utilizando la ecuación (5), al 8%. No se obtienen mejores resultados, ni es más fiable el procedimiento analítico de estimación de las pérdidas energéticas de los ecos.
- Una aplicación interesante de este equipo de georradar es su utilización para testificar el espesor de las capas de mezcla bituminosa, al acabar de extenderlas en obra. Es un procedimiento automático, suficientemente fiable, que emplea una técnica no-destructiva, rápida y de bajo coste.
- Sería conveniente hacer un ensayo inter-laboratorios con el fin de determinar de forma más precisa la fiabilidad de los equipos de georradar y el software de procesamiento de las medidas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- D.E. MESHER, C.B. DAWLEY; J.L. DAVIS, J.R. ROSSITER: Evaluation of new ground penetrating radar technology to quantify pavement structures. 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., enero 1995.
- J. MUÑOZ. Precisión y repetibilidad de las medidas del espesor de las capas de firmes mediante georradar. 14th IRF Road World Congress. Paris, junio 2001.
- S. S. SMITH, T. SCULLION. Development of Ground-Penetrating Radar Equipment for Detecting Pavement Condition for Preventive Maintenance. SHRP-H-772. octubre 1993.
- D.J. DANIELS. Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London, 1996
- A. WIMSATT, T. SCULLION, J. RAGSDALE, S. SERVOS: The use of ground penetrating radar in pavement rehabilitation strategy selection and pavement condition assesment. 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., enero 1998.