

Utilización de la placa de carga dinámica para la recepción de explanadas



Joaquín de Hita Alonso,
Director General de Infraestructuras
de Euroconsult, S.A.; y
Fernando Sánchez Domínguez,
Director Técnico de Euroconsult
Nuevas Tecnologías, S.A.

Resumen

En este artículo se analiza la experiencia obtenida en la realización de ensayos de carga con placa dinámica en las explanadas y capas de firme de varias grandes obras de infraestructura realizadas en los últimos años: urbanización del Ensanche de Vallecas, autopistas radiales de Madrid, autovía de circunvalación M-50, líneas de alta velocidad Segovia-Valladolid y Córdoba-Málaga, y plataformas del aeropuerto de Barajas.

La utilización de la placa de carga dinámica permite la realización de un gran número de ensayos con un rendimiento muy elevado y sin la necesidad del empleo de medios auxiliares,

cuya disponibilidad a menudo condiciona la ejecución de los ensayos. Además, disponer de un elevado volumen de datos posibilita un análisis de la homogeneidad de la explanada.

Se muestran en este artículo los rangos de valores obtenidos tanto en materiales granulares como en suelos estabilizados con cemento en algunas de las obras indicadas.

Se comparan los valores de los módulos dinámicos medidos con los módulos de los ensayos realizados con placa de carga estática según la Norma NLT-357-98.

Palabras clave: Explanadas, ensayo de recepción, carga con placa dinámica, alto rendimiento y análisis de homogeneidad.

Introducción

Las tendencias actuales en los trabajos de construcción de las principales obras de infraestructuras vienen orientadas hacia la comprobación del comportamiento real de las

unidades de obra ejecutadas, con objeto de verificar las propiedades deducidas de los procesos de cálculo y asegurar un correcto funcionamiento del conjunto de la infraestructura.

La formación de las explanadas y la construcción de los firmes no escapan a esta visión del proceso constructivo, y la reciente normativa que regula estas unidades de obra comienza a incorporar estos conceptos. Así, la vigente Norma 6.1 IC "Secciones de Firme" de la Instrucción de Carreteras establece tres categorías de explanada (E1, E2 y E3) en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga, obtenido de acuerdo con la Norma NLT-357.

El catálogo que se incluye en la citada Norma 6.1 IC es un conjunto de combinaciones de materiales de distintas características, dispuestos en capas de diferentes espesores, cuya ejecución con las condiciones de puesta en obra prevista en los Pliegos de prescripciones técnicas permite asegurar el cumplimiento de los

requisitos establecidos para las categorías de las explanadas.

La ejecución de las diversas capas que forman la explanada debe estar sujeta a la comprobación de sus condiciones de puesta en obra (lo que cabe denominar "ensayos de control"). Una vez finalizada la explanada, resulta oportuno realizar ensayos de recepción de la misma, cuyo objeto es verificar si, con la combinación de esas capas, se ha obtenido el resultado buscado; esto es, un valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (medido en el ensayo de placa de carga de la NLT-357), o bien, como indica la propia Norma 6.1 IC, un valor de la máxima deflexión patrón, que es función de la categoría de explanada requerida.

Cómo afrontar la recepción de explanadas

En los términos indicados en la normativa, la comprobación de las características de la explanada debe llevarse a cabo con una frecuencia que implica la ejecución de un alto número de ensayos de carga con placa. Al ser lenta la realización de estos ensayos (en función de los tipos de materiales utilizados en la obra, un ensayo puede durar varias horas) y requerir medios auxiliares (empleo de camión como reacción), el número de comprobaciones que habitualmente se llevan a cabo en obra es con frecuencia inferior al previsto; y muchas veces ni siquiera llega a alcanzar unos mínimos representativos que permitan asegurar la calidad de la explanada, que, como es sabido, va a condicionar de manera importante la vida útil del firme.

Por ello, resulta conveniente contar con métodos alternativos de recepción de explanadas que, utilizando equipos autónomos y de elevado rendimiento, permitan obtener un mayor número de datos y aportar una mejora en la fiabilidad del proceso de recepción.

La placa de carga dinámica

La placa de carga dinámica utili-

zada para la recepción de explanadas que se describe corresponde a la Dynaplaque 2, desarrollada por el LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*).

El fundamento físico consiste en una carga dinámica del suelo o explanada, de intensidad y duración definida, realizada por medio de la caída libre de una masa sobre una placa rígida de propiedades físicas conocidas. El impacto se amortigua por un elemento visco-elástico.

El valor del módulo de compresibilidad bajo carga dinámica E_{vd} , se calcula a partir de la relación de Boussinesq:

$$E_{vd} = \frac{1-\nu^2}{2r} k$$

La rigidez del suelo se determina suponiendo que el comportamiento de la placa de carga y del terreno bajo la misma es asimilable al de un sistema tipo masa/muelle/amortiguador, por lo que el equilibrio dinámico de la placa se rige por la ecuación:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = F(t)$$

donde:

- E_{vd} módulo de compresibilidad bajo carga dinámica
- ν coeficiente de Poisson del suelo
- k rigidez del suelo
- r radio de la placa dinámica
- c coeficiente de amortiguamiento del suelo
- m masa de la placa dinámica
- $z(t)$ medida del asiento en función del tiempo

$F(t)$ fuerza ejercida sobre la cara superior de la placa en función del tiempo

A partir del conocimiento de la masa de la placa, de la medida del asiento en función del tiempo, y de la fuerza ejercida sobre su cara superior en función del tiempo, pueden obtenerse los parámetros del terreno k y c .

El generador de impactos está constituido por una placa de carga y un dispositivo de carga dinámica.

La carga dinámica sobre el suelo resulta equivalente al paso de un eje de ciento treinta kilonewtons de pe-

so (130 kN) a una velocidad de sesenta kilómetros por hora (60 km/h). En la figura 1 se muestra el sistema de generación de impactos de la placa de carga.

La placa de carga dinámica se coloca sobre el terreno, y se procede a la aplicación de tres escalones de carga sucesivos sobre el mismo punto. El valor numérico del módulo de compresibilidad bajo carga dinámica (E_{vd}) que se considera es el obtenido durante el tercer escalón de carga, siempre teniendo en cuenta que el rango de medida del equipo es de 20 a 250 MPa.

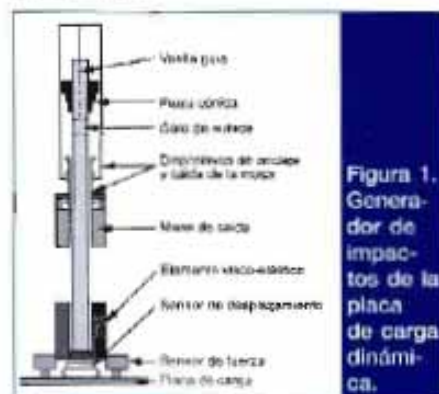


Figura 1. Generador de impactos de la placa de carga dinámica.

La deflexión del terreno y la fuerza del impacto se miden por unos sensores instalados en la placa.



Figura 2. Placa de carga dinámica.

Además, el vehículo va equipado con un ordenador, que procesa toda la información del ensayo, y un GPS de precisión submétrica que permite conocer el posicionamiento exacto del equipo, lo que facilita de manera sustancial la ubicación exacta de los puntos de ensayo.

Utilización de la placa de carga dinámica en recepción de explanadas

En los últimos tres años, se ha venido utilizando la placa de carga di-

námica en la recepción de las explanadas realizadas en algunas de las obras de infraestructuras de mayor importancia en nuestro país. Se exponen a continuación las conclusiones extraídas del análisis de los datos obtenidos. Cabe señalar que este procedimiento se ha empleado en las autopistas radiales de Madrid, en la autovía de circunvalación M-50, en las plataformas de la ampliación del aeropuerto de Barajas, en el Ensanche de Vallecas y en algunos tramos de las líneas ferroviarias de alta velocidad en ejecución, además de en multitud de obras de menor entidad. Esto ha permitido disponer de muchos datos de correlaciones entre los valores obtenidos con las placas tradicionales y la placa de carga dinámica. En cualquier caso, por encima de las ecuaciones de correlación halladas, la ventaja principal que se obtiene de su utilización es el elevado volumen de información disponible sobre la calidad y el comportamiento de la explanada ejecutada, lo que permite detectar las zonas con menor capacidad de soporte y realizar sobre ellas los pertinentes estudios de detalle que profundicen en las diversas causas que originan los comportamientos disconformes.

Para la realización de las correlaciones entre los ensayos de carga estática y dinámicos no deben perderse de vista los diámetros de las placas utilizadas en el ensayo estático (la placa cuyo uso está más extendido es la de 300 mm de diámetro, en tanto que la placa de carga dinámica tiene un diámetro de 600 mm). En función del tamaño de placa utilizado, variará el espesor de material cuyas características se están analizando. Las correlaciones han resultado ser ligeramente mejores cuando la placa estática utilizada es de 600 mm.

Recepción de explanadas ejecutadas con materiales granulares

Los resultados que se recogen a continuación (figuras 3, 4 y 5) representan el resumen de los datos obtenidos en la recepción con placa de

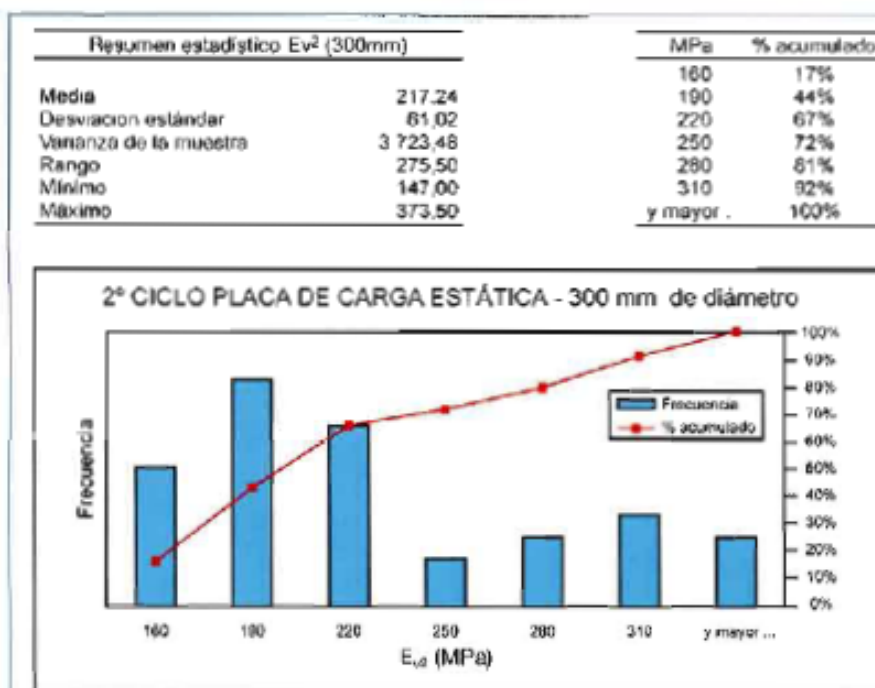


Figura 3. Resumen estadístico de E_{v2} con placa de carga de 300 mm. Materiales granulares.

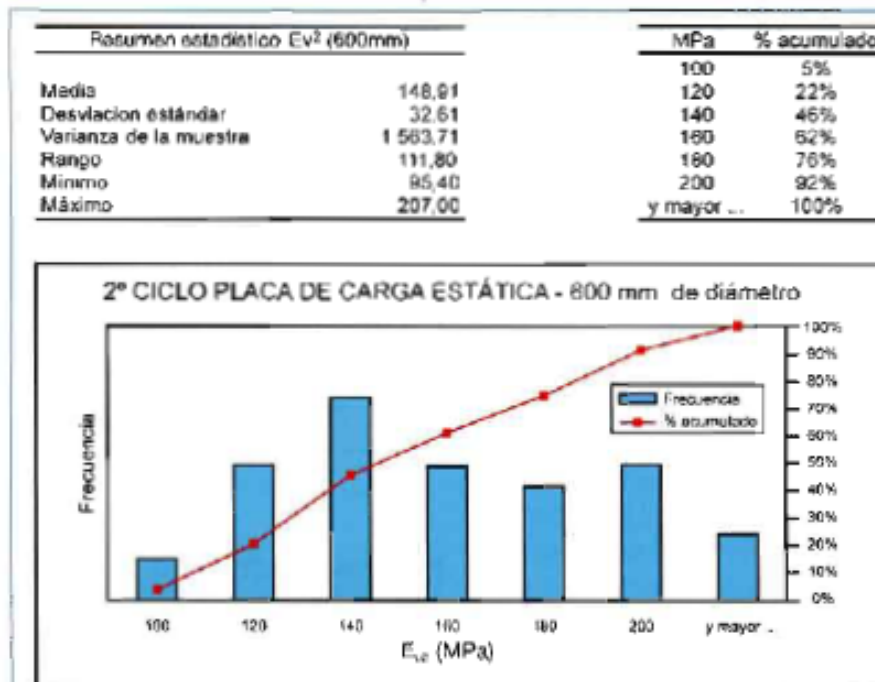


Figura 4. Resumen estadístico de E_{v2} con placa de carga de 600 mm. Materiales granulares.

carga dinámica de explanadas (o capas de sub-balasto y capas de forma de plataformas ferroviarias) constituidas por materiales granulares.

Observando los tres histogramas representados, correspondientes a los módulos de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) con placa de 300 y 600 milímetros de diámetro y al módulo de compresibilidad bajo carga dinámica (E_{vd}) con placa de 600

milímetros respectivamente, se aprecia bastante semejanza entre los mismos, destacando la existencia de dos poblaciones distintas en cada uno de ellos.

También se ha analizado la correlación existente entre los módulos de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) con placa de 300 y 600 milímetros de diámetro y los módulos de compresibilidad bajo carga

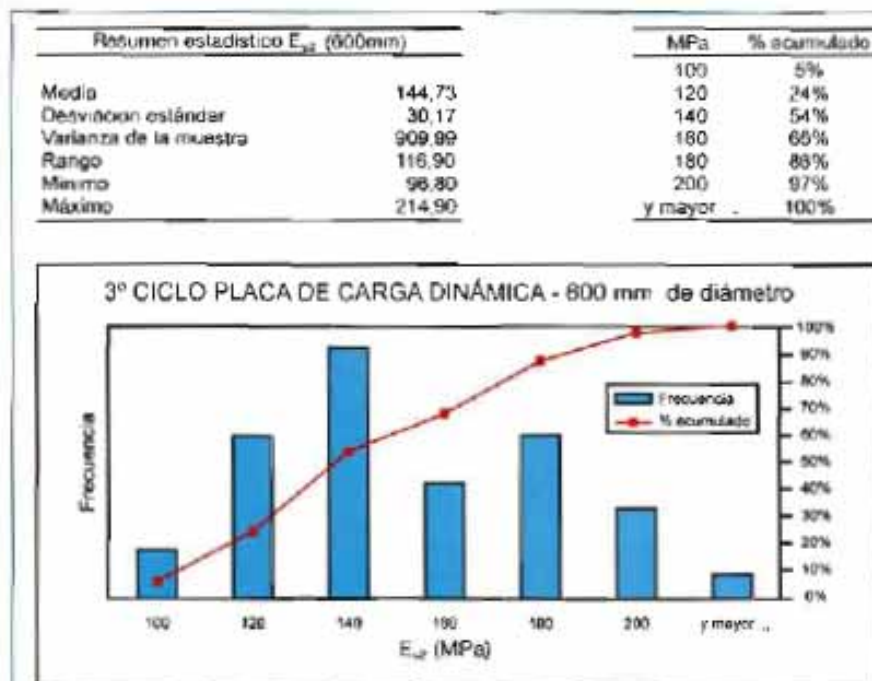


Figura 5. Resumen estadístico de E_{u2} con placa dinámica de 600 mm. Materiales granulares.

dinámica (E_{u2}) con placa de 600 milímetros (figura 6 y 7). De dicha comparación se puede concluir que, para explanadas constituidas por materiales granulares en las condiciones ensayadas, existe una buena correlación entre estos módulos, pudiéndose establecer, de forma aproximada, las siguientes equivalencias:

$$E_{u2} \text{ (con placa } \varnothing 300 \text{ mm)} = 1,5 \times E_{u1}$$

$$E_{u2} \text{ (con placa } \varnothing 600 \text{ mm)} = 1,0 \times E_{u1}$$

Esta equivalencia, obtenida entre el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{u1}) con placa de 600 milímetros de diámetro y el módulo de compresibilidad bajo carga dinámica (E_{u2}), está en consonancia con lo recogido en el "Catálogo francés de estructuras tipo de firmes de nueva construcción", en el que se hace referencia a la necesidad de alcanzar unos determinados valores del módulo de deformabilidad para la aceptación y clasificación del terreno ensayado, independientemente de los equipos (estáticos o dinámicos) utilizados en el ensayo.

Recepción de explanadas ejecutadas con suelos estabilizados

En gran parte de las obras ejecutadas recientemente con suelos es-

tabilizados, se ha optado por la realización de ensayos de placa de carga dinámica. Su elevado rendimiento permite determinar la calidad y el comportamiento de las explanadas ejecutadas, delimitando las zonas con menor capacidad portante. Disponer de un elevado volumen de datos posibilita la realización de análisis estadísticos completos. Con ello se busca obtener de cada tramo zonas homogéneas, en las que los datos medidos muestren que el comportamiento sea similar. A modo de ejemplo, en la figura 8 se recoge el histograma de los resultados del ensayo de placa de carga dinámica realizados en una explanada con suelo estabilizado con cemento.

En estas obras también se han realizado algunos ensayos de placa de carga estática que han permitido

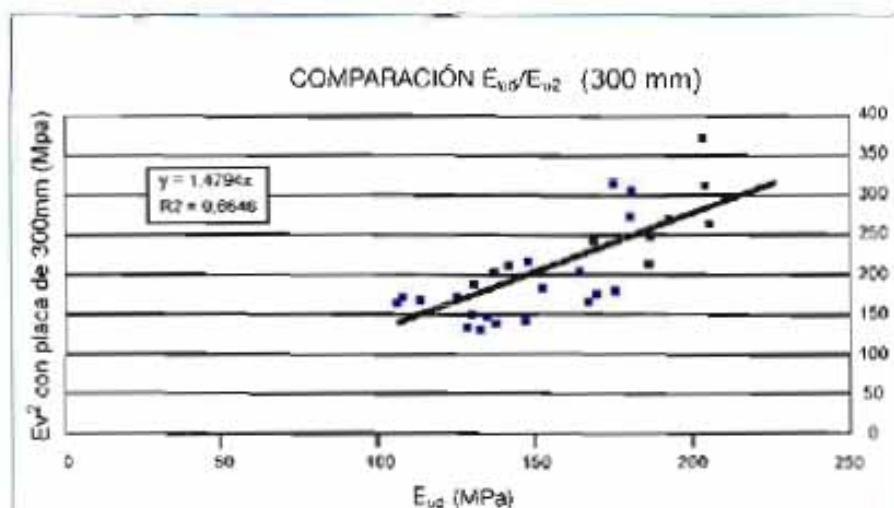


Figura 6. Correlación entre E_{u1} y E_{u2} con placa de 300 mm. Materiales granulares.

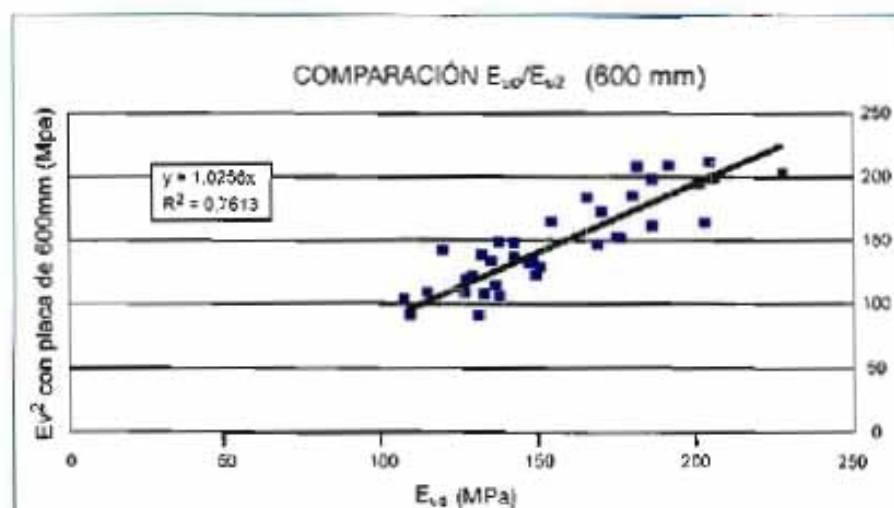


Figura 7. Correlación entre E_{u1} y E_{u2} con placa de 600 mm. Materiales granulares.

Resumen estadístico E_{vd} (300mm)		MPa	% acumulado
Medio	133,31	100	25%
Desviación estándar	45,87	120	44%
Varianza de la muestra	2 113,52	140	58%
Rango	208,00	160	71%
Mínimo	41,00	180	87%
Máximo	256,00	200	98%
		y mayor	100%

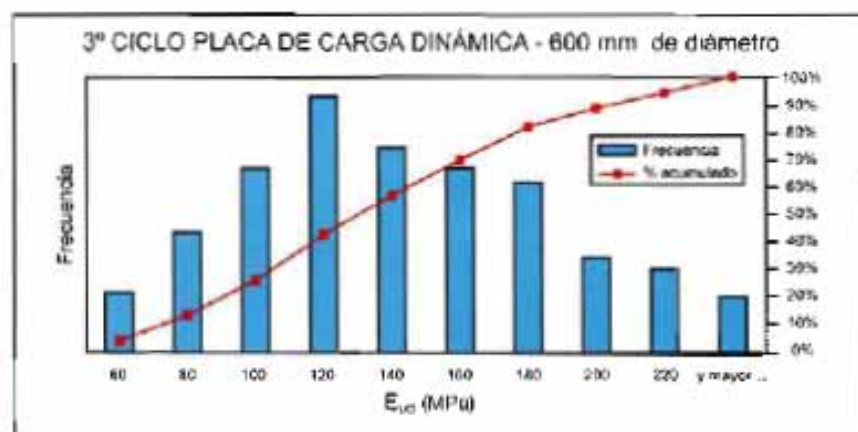


Figura 8. Resumen estadístico de E_{vd} con placa de carga dinámica. Suelo estabilizado con cemento.

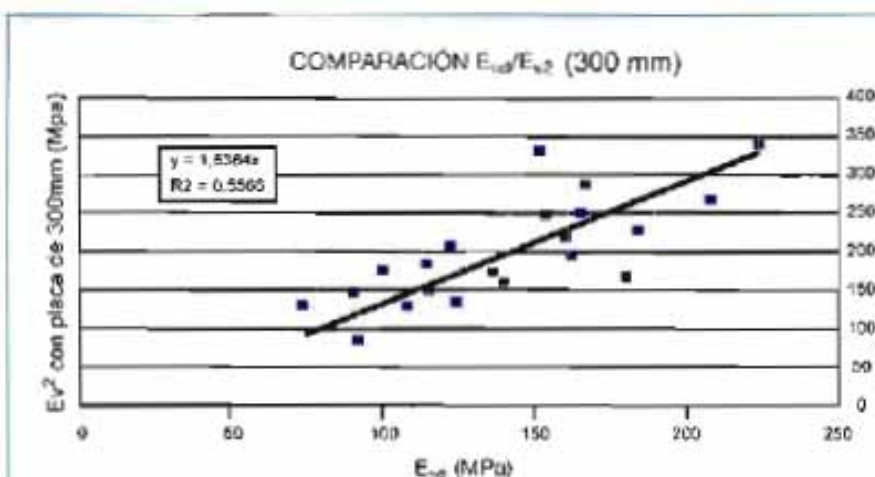


Figura 9. Correlación entre módulo dinámico E_{vd} y módulo estático E_{v2} (obtenido con placa de 300 mm). Suelo estabilizado con cemento.

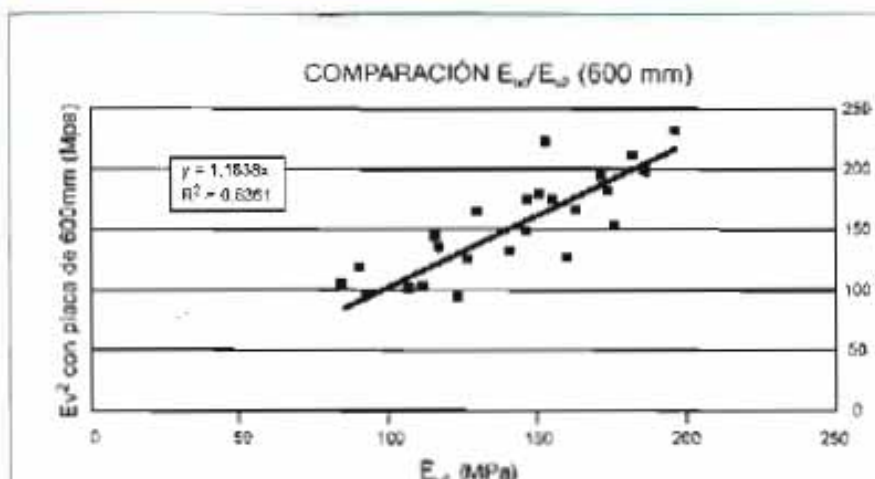


Figura 10. Correlación entre módulo dinámico E_{vd} y módulo estático E_{v2} (obtenido con placa de 600 mm). Suelo estabilizado con cemento.

establecer ciertas correlaciones entre este ensayo y el de placa de carga dinámica con los materiales utilizados y la puesta en obra ejecutada en cada caso. Estas correspondencias son mejores en el caso de placa de carga estática de 600 mm de diámetro. En las figuras 9 y 10 se recogen los datos obtenidos en la recepción con placa de carga dinámica de un suelo estabilizado con cemento.

5. Conclusiones

La utilización de la placa de carga dinámica para la recepción de explanadas supone una alternativa muy interesante a las tradicionales placas de carga estáticas, ya que permite la realización de un gran número de ensayos con un rendimiento muy elevado y sin la necesidad del empleo de medios auxiliares, cuya disponibilidad a menudo condiciona la ejecución de los ensayos. Además, la velocidad de realización de cada ensayo implica una afección prácticamente nula a los trabajos de construcción.

Por otro lado, disponer de un elevado volumen de datos sobre la calidad y el comportamiento de la explanada ejecutada posibilita un análisis de homogeneidad, lo que permite detectar las zonas con menor capacidad de soporte, y realizar sobre ellas los pertinentes estudios de detalle que profundicen en las diversas causas que originan los comportamientos no conformes de la explanada.

6. Bibliografía

1. Catálogo de estructuras tipo de firmes de nueva construcción del Ministerio francés de Infraestructuras, 1998.
2. NF P94-117-1 Módulo bajo carga estática con placa (E_{v2}) de abril de 2000.
3. PR NF P94-117-2 Módulo bajo carga dinámica con placa sometida a encuesta en abril de 2003.
4. GOMES CORREIA, A.: "COST 337. Modelling and Advanced Testing for UGM". Lisboa, enero 1999.