

Evaluación de la deformabilidad de terraplenes mediante métodos dinámicos: Aproximación teórica al estado de la cuestión



Rebeca Carabot Moreno
ICCP del Estado
Subdirección General
de Estudios y Proyectos
Álvaro Parrilla Alcaide
ICCP del Estado
Área de Geotecnia -
Dirección Técnica
Dirección General de Carreteras -
Ministerio de Fomento

Resumen

El control de la estabilidad volumétrica de las tongadas de los rellenos tipo terraplén se ha abordado, tradicionalmente, a través del ensayo de carga con placa (estática). Sobre este ensayo se dispone de un gran conocimiento práctico, pero se requiere, para su realización, de la materialización de grandes cargas y tiempos de espera prolongados. En este artículo se presentan una serie de equipos, existentes en el mercado español, que pretenden solventar dicha problemática, si bien, hasta el momento, se cuenta con poca experiencia sobre su empleo en nuestro país.

PALABRAS CLAVE: *Geotecnia vial, ensayo, terraplén, construcción de carreteras, control de calidad, normativa de carreteras.*

1. Introducción

Entre el quince y el veinte por ciento del presupuesto global de las inversiones en obras de nueva planta de carretera y ferrocarril en el ámbito europeo se destina a la ejecución de rellenos y desmontes, según datos del Comité CEN TC 396 *Earthworks*, encargado de las obras de tierra en el seno del Comité Europeo de Normalización.

La normativa vigente en la mayoría de los países del viejo continente se basa en la aplicación de diferentes sistemas nacionales de clasificación de suelos y de ejecución y control de calidad de rellenos y desmontes. Estos sistemas normalmente se utilizan en cada Estado como un todo perfectamente organizado, conteniendo prescripciones que abarcan, al menos, las fases de proyecto, ejecución y control, resultando difícilmente traspasables de unas naciones a otras.

El mencionado Comité Técnico Europeo, a través de sus grupos de trabajo, está realizando un esfuerzo importante por tratar de aproximar posturas y compartir criterios y conceptos entre sus miembros, en un campo en el que, respetando las lógicas di-

ferencias nacionales, a priori cabría esperar un mayor consenso previo.

Probablemente, en un futuro no muy lejano pueda contarse con un documento común en la materia, en el que los diferentes países europeos puedan verse reflejados, sin menoscabo de sus singularidades.

Uno de los problemas que más preocupa a nivel continental es el control de ejecución de los rellenos, siendo la exigencia final de estabilidad volumétrica en los mismos durante la vida en servicio de la infraestructura, una lógica constante en todos los países.

2. Normativa de aplicación en España dentro del ámbito de la Dirección General de Carreteras

En España, y dentro del marco de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, con la versión vigente¹ del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG 3), los rellenos pueden clasificarse en cuatro categorías:

- Terraplenes (art. 330).
- Pedraplenes (art. 331).
- Rellenos todo uno (art. 333).
- Rellenos localizados (art. 332).

Los tres primeros tipos de rellenos se caracterizan por permitir, con carácter general, el empleo de equipos pesados de compactación de alto rendimiento, y se diferencian entre sí, de manera primigenia y como modo definitorio de una u otra clasificación, por la granulometría del material que los constituye.

A partir de estas diferencias en la granulometría, los procedimientos de ejecución presentan grandes divergencias, lógicas cuando se trata de materiales con diferencias cifrables en varios órdenes de magnitud en el tamaño medio de sus partículas.

El control de ejecución se aborda, asimismo, de manera distinta, siendo el caso de los terraplenes y rellenos localizados fundamentalmente de "producto terminado" y el de los pedraplenes y rellenos todo uno de "procedimiento". No obstante, y si bien los conceptos recién referidos se entienden correctos en líneas generales, cabría afirmar que, ateniéndose a la literalidad del Pliego, en terraplenes se permite el control de procedimiento en determinadas circunstancias; y en los demás rellenos se establecen una serie de tolerancias geométricas finales (producto terminado) en el núcleo y la zona de transición.

En el control de ejecución de los terraplenes, la unidad o "producto" que se controla es la tongada concluida. Sus características fundamentales de ejecución y puesta en obra se fijan en diferentes apartados del mencionado Pliego (la mayor parte de ellas en el epígrafe 330.6.2).

El control de compactación de terraplenes tiene por objeto comprobar, tongada a tongada, dos cuestiones diferentes:

- Que se cumplen unas determinadas condiciones de densidad seca y humedad definidas en el Proyecto. Nótese que el control no se refiere únicamente a la densidad seca, como venía siendo habitual, sino a la pareja de valores que, junto con la humedad del suelo en cuestión, configura su ubicación precisa en el diagrama de compactación Próctor.
- Que las características de deformabili-



En el control de ejecución de los terraplenes, la unidad o "producto" que se controla es la tongada concluida

dad sean las adecuadas para asegurar un comportamiento aceptable del relleno.

Con relación a este último aspecto, el PG 3 establece como ensayo de referencia con carácter general el denominado "de carga con placa", también conocido como de "placa estática" por las condiciones requeridas para su realización. La norma española² para su materialización es la UNE 103808.

El ensayo consiste en la aplicación de dos ciclos de carga y uno de descarga intermedio sobre una placa metálica de sección circular de 300, 600 ó 762 mm de diámetro, obteniéndose, como resultado del mismo, dos módulos (E_{v1} y E_{v2}) por cada punto controlado, ubicado en la superficie de una determinada tongada. Los dos módulos en cuestión deben determinarse una vez aplicados los correspondientes escalones de carga y descarga, y resultan directamente proporcionales al diámetro de la placa y a un valor de presión determinado por diferencia entre dos instantes concretos del ciclo anterior, e inversamente proporcionales a los asientos medidos en dichos instantes.

Para la aceptación de una determinada tongada, el Pliego exige el cumplimiento simultáneo de las siguientes condiciones:

- Valores mínimos del módulo de deformación vertical obtenido en el segundo ciclo de carga (E_{v2}). Se requieren valores distintos en función de la zona del relleno en que se está trabajando y del

tipo de suelo utilizado en ella:

- En coronación, cien megapascals ($E_{v2} \geq 100$ MPa) para los suelos seleccionados y sesenta megapascals ($E_{v2} \geq 60$ MPa) para el resto.
- En cimient, núcleo y espaldones, cincuenta megapascals ($E_{v2} \geq 50$ MPa) para los suelos seleccionados y treinta megapascals ($E_{v2} \geq 30$ MPa) para el resto.

- Cumplimiento de la relación de módulos entre los ciclos referidos, limitándose ésta a un valor máximo de dos coma dos ($K = E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$).

Los ensayos de "placa estática" resultan de ejecución laboriosa, siendo necesario el empleo de equipos pesados (normalmente camiones cargados) para proporcionar la reacción sobre las placas, a la par que tiempos de ejecución prolongados para materializar y estabilizar los correspondientes escalones de carga. La realización de uno de estos ensayos suele requerir más de una hora. Pese a todo lo anterior, existe una larga tradición en su realización avalada, en general, por la obtención de resultados suficientemente satisfactorios; de ahí que, pese a los inconvenientes anteriores, los ensayos estáticos

¹ Orden FOM 1382/2002 de 16 de mayo (BOE de 11 de junio).

² UNE 103808 Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática. Aunque en el PG 3 figura su antecesora, la norma NLT 357 Ensayo de carga con placa, a los efectos de este documento pueden considerarse equivalentes.



Ejecución de un ensayo de carga mediante placa estática

vengan usándose en la práctica.

La búsqueda de sistemas más versátiles que proporcionen, cuando menos, idéntica fiabilidad, constituye uno de los principales afanes y líneas de trabajo de las Administraciones, equipos de investigación y laboratorios de control, tanto en España como en los países de nuestro entorno.

Existen en el mercado diferentes sistemas o equipos comerciales patentados que tratan de abordar el problema, aunque por diferentes vías y con unos criterios de aplicabilidad normalmente distintos entre sí; pudiendo afirmarse que, si bien el problema no está resuelto en su globalidad, sí hay diferentes aproximaciones al mismo.

No obstante, la sustitución de los sistemas de control tradicionales (placa de carga estática) por otros nuevos no está totalmente contrastada ni se dispone de suficiente experiencia como para propiciar, por el momento, un cambio normativo en ese sentido.

En este artículo se trata de revisar algunos de los sistemas que se encuentran disponibles hoy día, sin perder de vista que se trata de equipos sujetos a patente y que todos ellos son comercializados en España, con carácter de exclusividad, por alguna empresa.

Tampoco se entienden preferibles los unos sobre los otros: simplemente tratan de exponerse de una forma global y somera, para su mayor difusión y mejor conocimiento general.

3. Los ensayos de carga de suelos de tipo dinámico

Desde hace alrededor de una veintena de años se trabaja en la puesta a punto de nuevos equipos y ensayos que permitan solventar la problemática expuesta.

Al igual que en el caso de la placa estática, mediante estos nuevos procedimientos y equipos se pretende obtener una aproximación al valor de la deformabilidad de la tongada por medio de algún parámetro de tipo rigidez o asimilable. En consecuencia, el resultado de la medición presenta ecuaciones de dimensión propias de un módulo de elasticidad (unidades de presión: pascas y sus múltiplos en el Sistema Internacional), si bien dichos módulos se obtienen de modos claramente diferentes y sus significados no son análogos. Estas diferencias de planteamiento han de tenerse en cuenta tanto en la comparación entre equipos estáticos y dinámicos, como en la que pueda efectuarse de los diferentes equipos dinámicos entre sí.

En varios de los procedimientos que van a describirse, los fabricantes denominan al módulo obtenido con su procedimiento como módulo dinámico, por comparación o analogía con la placa estática, referente último de estos ensayos; no debiendo perder de vista que el concepto de módulo, aislado y sin referencia al equipo y procedimiento empleado, se encuentra vacío de contenido.

Hasta la fecha, las principales líneas de

trabajo han apuntado en dos direcciones complementarias:

- Caracterización de un área muy reducida, asimilable a un único punto concreto. Cada uno de estos puntos de control está ubicado en la superficie de la tongada, excepto en el caso de uno de los equipos, en el que se analiza la vertical del punto.
- Caracterización de una superficie, de anchura muy inferior a su longitud, asimilable a una línea: normalmente suele seguirse un eje de calzada, carril, etc.

Mientras que los primeros presentan una analogía conceptual relativamente importante con la placa estática y pretenden la caracterización de un único punto mediante la obtención de valores absolutos de los correspondientes módulos, además de la validación completa de la tongada por sucesivas reiteraciones del procedimiento en diferentes ubicaciones, los segundos pretenden la evaluación de la uniformidad de una determinada banda o línea dentro de aquella, detectando diferencias relativas de rigidez entre sus zonas.

Por el momento no se dispone de correlaciones totalmente contrastadas entre los equipos estáticos y dinámicos, ni de estos últimos entre sí, por lo que las tendencias de cara a su posible validación o aceptación, pasan por dos líneas fundamentales:

- Obtención de correlaciones entre el módulo dinámico por un determinado procedimiento (con un equipo concreto) y el estático, normalmente el correspondiente al segundo ciclo de carga (E_v), en la placa estática de un determinado diámetro. A su vez estas correlaciones podrían ser:
 - De validez general o universales.
 - De validez relativa, referidas a determinados tipos de terreno o materiales.
 - Específicas para cada obra, tipo de terreno o emplazamiento concreto, tras la realización de tramos de prueba in situ.
- Obtención de valores del módulo dinámico que permitan la aprobación directa de una tongada tras la validación de un determinado número de puntos o alineaciones en su caso, en función de la experiencia con el equipo concreto de que se tratase en cada caso.

Si bien en este artículo únicamente quieren exponerse las vías posibles desde un punto de vista teórico, sí se destacan como argumentos a favor y en contra de una u otra líneas de trabajo los siguientes:

- Correlación entre módulos estáticos y dinámicos con un equipo concreto:
 - Como principal ventaja se encuentra la vasta experiencia con la que se cuenta en el empleo de la placa estática, constituyendo sus resultados un referente ampliamente conocido y suficientemente contrastado.
 - Como inconveniente principal sobresale la dificultad de la obtención de las mencionadas correlaciones; así la propia interpretación de los resultados de la placa estática, la determinación de la profundidad de influencia de su bulbo de presiones o las diferencias entre emplear uno u otro diámetro entre los que establece la norma de ensayo son cuestiones, entre otras, que no se encuentran suficientemente resueltas. La complejidad de correlacionar a su vez estos resultados con los de otros equipos que introduzcan fundamentos teóricos de tipo dinámico resulta aún mayor.
- Obtención directa de valores que permi-

tan la aprobación de la tongada con un equipo concreto:

- La principal ventaja de esta opción estriba en su sencillez y aplicabilidad práctica. Los trabajos llevados a cabo por los fabricantes se han centrado normalmente en esta línea, por resultar de aplicación inmediata al producto comercial de que se trate.
- El inconveniente más importante de esta opción estriba en no disponer de referencias más universales que permitan comparar equipos y resultados entre sí, así como establecer campos de aplicación preferentes para unos y otros.

Sin ánimo de exhaustividad, a continuación se enumeran y clasifican los equipos de aplicación al control de las tongadas de los terraplenes, de que se tiene conocimiento en la fecha de redacción de este artículo:

- De caracterización puntual:
 - Placas dinámicas.
 - Penetrómetro dinámico de energía variable.
 - Geo-Gauge.
- De caracterización de una línea:
 - *Portancemètre*.
 - Instrumentación de compactadores.

Las principales características de cada uno de los equipos se describen a continuación. Se insiste en el hecho de que se trata de aquellos de los que se tiene constancia hasta la fecha y que se encuentran presentes en el mercado español, sujetos a patente o bajo representación comercial exclusiva en nuestro país.

3.1. Equipos de caracterización puntual

3.1.1. Placas dinámicas

La aplicación dinámica de la carga se materializa por medio de la caída libre de una masa sobre una placa rígida, siendo amortiguado el impacto por un elemento visco elástico. La rigidez del terreno se determina en cada caso suponiendo que el comportamiento de la placa dinámica es asimilable a un conjunto masa / muelle / amortiguador, de propiedades conocidas. Los módulos en cuestión se obtienen relacionando las cargas instantáneas aplicadas con los asientos generados.

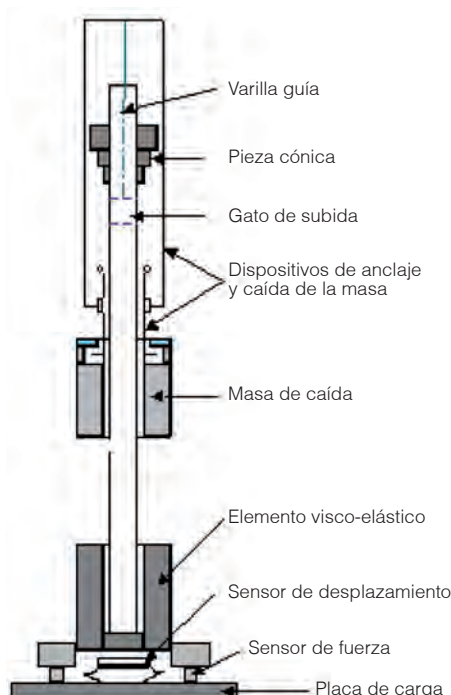
En España existen hasta la fecha dos procedimientos de ensayo recogidos en otras tantas partes de la norma *UNE 103807 Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica*.

Método 1: placa rígida $2r = 600$ mm (UNE 103807-1)

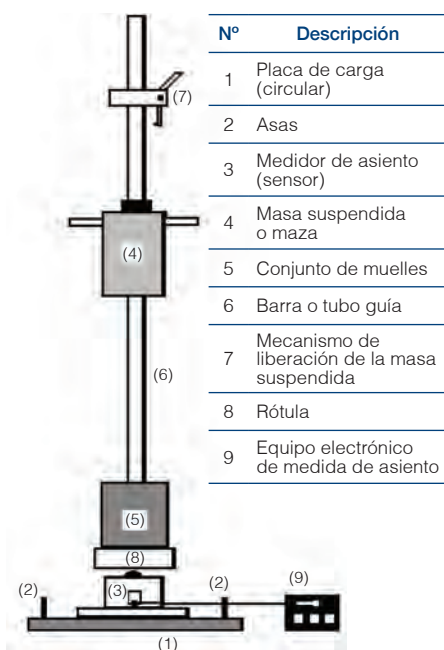
El procedimiento y equipo en cuestión responden a un desarrollo francés del “*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*”. El equipo se transporta en una furgoneta, se extrae lateralmente por medio de un brazo mecánico, se posiciona en un punto concreto procediéndose, posteriormente, a la aplicación de una serie de cargas de valor y duración predefinidos, materializadas a través de la caída, por tres veces, de una masa desde una determinada altura. En ello consiste el ensayo dinámico propiamente dicho, que se normalizó inicialmente en Francia a través de la norma NF P 94 117-2.

El equipo integra la placa de carga, el dispositivo de carga y el de medida; presenta forma cilíndrica, siendo su diámetro el de la placa (que ocupa la parte inferior), y su altura algo inferior a la de una persona adulta de estatura media. El ensayo puede realizarse por un único operario, si bien nunca de forma enteramente manual, pues la masa de impacto es de ciento veinte kilogramos (120 kg).

El equipo en cuestión se conoce con el nombre comercial de “*Dynaplaque*” teniendo constancia de, al menos, dos desarrollos sucesivos del mismo. Presenta un diámetro de seiscientos milímetros ($2r = 600$ mm) y proporciona una reacción



Método 1: placa rígida $2r = 600$ mm (UNE 103807 - 1). Esquema general y vista del equipo (fuentes: norma española y LCPC)



Método 2: placa rígida $2r = 300$ mm (UNE 103807 - 2). Esquema del equipo (fuente: norma española)

al terreno equivalente a un eje de ciento treinta kilonewtons (130 kN) que se desplaza a una velocidad de sesenta kilómetros por hora (60 km/h).

El rango de validez de la medición (rigidez del terreno determinada por el propio equipo) es el comprendido entre veinte y doscientos cincuenta megapascals ($20 \leq E_{vd} \text{ (MPa)} \leq 250$) y su rendimiento se cifra en unas quince o veinte

estimaciones por hora, aunque obviamente depende en gran medida de las distancias entre puntos de lectura.

Método 2: placa rígida $2r = 300$ mm (UNE 103807-2)

Se trata de una serie de procedimientos y equipos de menores dimensiones que el anterior, que pueden transportarse y manejarse enteramente a mano. Aunque existen diferentes modelos en el mercado, todos ellos son muy parecidos entre sí: en esencia, constan de una placa, un mástil, una masa de caída y una serie de dispositivos electrónicos de medida. Suelen conocerse bajo el sobrenombre genérico de "equipos ligeros de impacto".

El ensayo se describió primeramente en Alemania a través del documento TP BF StB parte B 8.3, y se puede realizar enteramente por un único operador quien, una vez enrasada y preparada el área de ensayo, procede a colocar la placa con el dispositivo de carga centrado sobre la misma y en posición vertical.

El ensayo dinámico propiamente dicho se inicia con la realización una serie de impactos preliminares sobre la superficie del terreno (sin lecturas de asiento), al objeto de que la placa alcance un adecuado contacto con el suelo. Tras estos primeros impactos deben efectuarse otros, ya con el

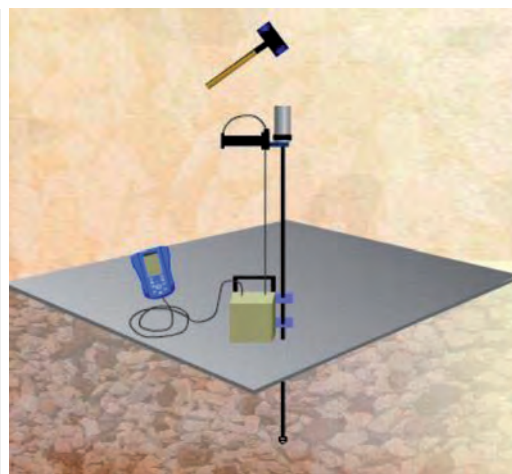
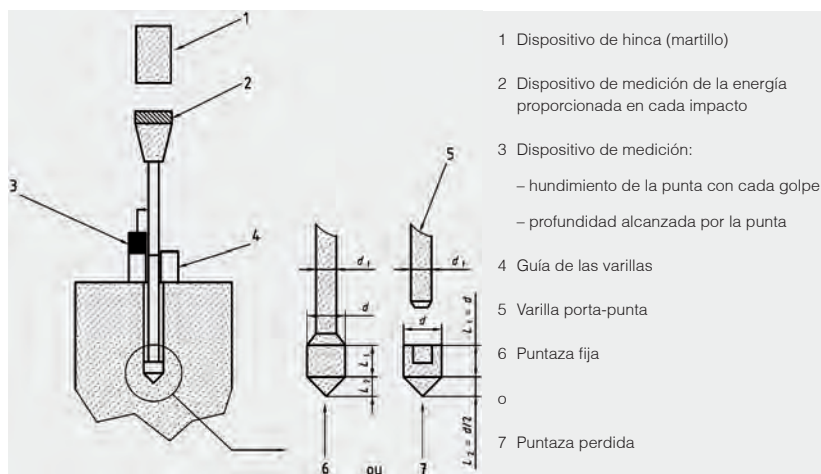
equipo electrónico de lectura de medidas encendido, que son los que se tienen en cuenta para la determinación de la rigidez del terreno.

Los impactos se materializan cuando el operador procede a soltar la masa desde una altura previamente calibrada. Dicha masa sigue la trayectoria que le marca la barra de guía (sentido descendente), impacta sobre los muelles, transmite el impacto a la placa, desde donde a su vez es transmitido al terreno, y rebota, siguiendo de nuevo la trayectoria de la barra guía (sentido ascendente), debiendo ser capturada a mano y fijada en su posición de partida por el operador.

El rango de medición de rigideces especificado para la mayoría de los equipos es el comprendido entre quince y setenta megapascals ($15 \leq E_{vd} \text{ (MPa)} \leq 70$) según su propia sistemática, si bien algunos fabricantes fijan su límite inferior en cinco megapascals ($E_{vd} \geq 5 \text{ MPa}$).

El tiempo requerido para la realización del ensayo en un punto depende fundamentalmente de la pericia del operador, si bien descontando el tiempo empleado en desplazamientos, puede situarse entre tres o cuatro y diez minutos como media, en función de las características del terreno de apoyo.





Penetrómetro ligero de energía variable: esquema y vista general (fuentes: norma francesa y fabricante)

3.1.2. Penetrómetro dinámico de energía variable

Este equipo francés, más conocido por su nombre comercial como “Panda”, se considera de energía variable, pues pueden modificarse tanto la masa de impacto como las características de varillaje y puntaza. Aunque es posible su empleo completamente manual, también se comercializan útiles para proceder a la hincada de forma automática.

A diferencia de los anteriores, más que un valor concreto relativo a un punto a partir de un ensayo realizado en superficie, este equipo proporciona un gráfico de resistencias a la penetración en la vertical del mismo, en función de la profundidad (expresado en unidades de presión), obtenido tras la hincada por golpeo manual con martillo, de un varillaje terminado en un útil con puntaza cónica. La resistencia a la penetración se obtiene tras determinar, tanto la energía suministrada al varillaje, como el asiento de la puntaza.

El ensayo (regulado en su país de origen por la norma experimental XP P 94-105) permite determinar si la compactación se ajusta a lo especificado para una determinada obra concreta, por comparación entre el penetrograma obtenido en campo y una serie de curvas tipo que conforman una base de datos y que se emplean como referencia, en función de los siguientes criterios:

- Tipo de suelo utilizado en la ejecución del relleno, de acuerdo con las clasificaciones francesa, alemana, británica, AASHTO o USCS.
- Porcentaje de compactación requerido, en relación con la densidad

máxima del ensayo Próctor de referencia.

- Estado de humedad en el momento de la realización del ensayo, de acuerdo con la sistemática francesa sobre el particular.

3.1.3. Geo-Gauge

Se trata de un equipo de origen estadounidense, con forma exterior cilíndrica que se maneja de forma enteramente manual. Pesa unos diez kilogramos (10 kg) y tanto su altura como su diámetro rondan los treinta centímetros (30 cm).

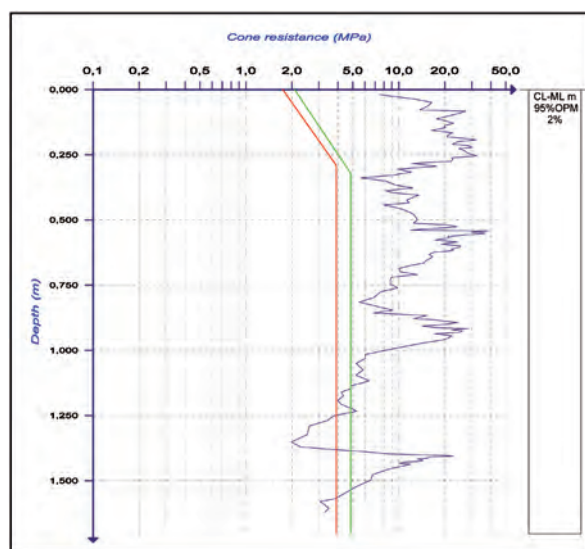
Elegido el emplazamiento, se posiciona el aparato que entra en contacto con el terreno a través de un anillo de apoyo, que a su vez soporta el peso del equipo propiamente dicho mediante un segundo anillo de goma. El equipo genera una serie de vibraciones de pequeña amplitud en veinticinco (25) frecuencias diferentes comprendidas entre cien y doscientos hercios (100-200 Hz), a la vez que mide las deformaciones a que dan lugar sobre el terreno, lo que normalmente acaba por traducirse en una huella anular en el mismo. En este rango de frecuencias y deformaciones, la rigidez es proporcional al módulo de elasticidad. Debe suponerse, además, un valor concreto para el módulo de Poisson del terreno, aunque su influencia

relativa en el resultado (tomando valores adecuados a partir de la bibliografía) es moderada.

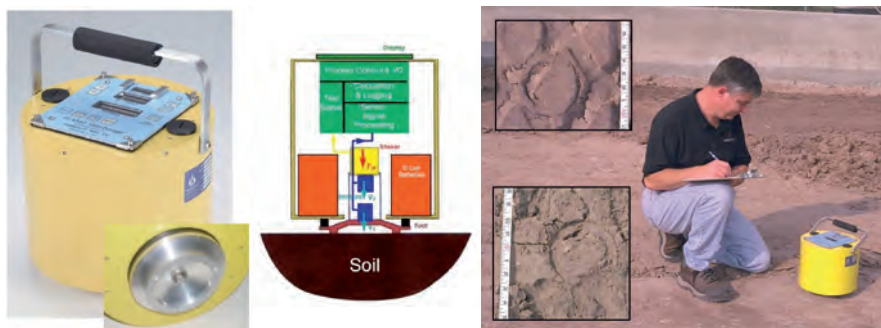
Según el fabricante, el valor del módulo obtenido resulta representativo de una profundidad comprendida entre la superficie del terreno y unos veinte o treinta centímetros (20-30 cm) y el rango de medición para el módulo, obtenido con su propia sistemática, se encuentra comprendido entre veinticinco y seiscientos megapascals ($25 \leq E_g \text{ (MPa)} \leq 600$).

3.2. Equipos de caracterización de alineaciones

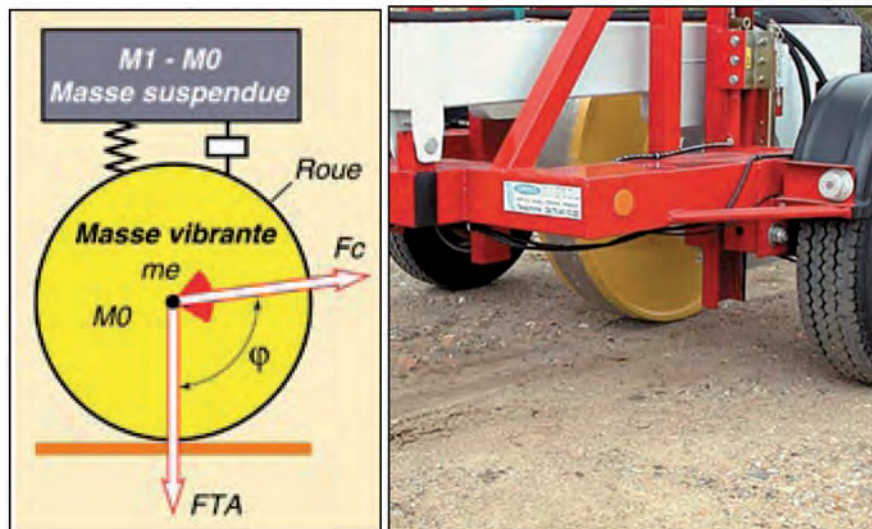
Al igual que en el caso de los equipos de caracterización puntual, los de caracterización de líneas proporcionan valores representativos de propiedades del terreno



Ejemplo de registro obtenido con el penetrómetro ligero de energía variable y superposición de curvas de referencia (fuente: fabricante)



GeoGauge: Vistas, esquema general del equipo y detalle de las huellas (fuente: fabricante)



Esquema general y detalle de la rueda del portancímetro (fuente: LCPC)

con ecuaciones de dimensión de módulo de elasticidad.

La principal diferencia con los anteriores estriba en que ahora se obtienen módulos, relativos no ya a puntos concretos, sino a líneas que normalmente habrán sido definidas previamente y coincidirán con ejes de calzada, de carril, etc., si bien pueden ser cualesquiera.

Una de sus principales ventajas consiste precisamente en que permiten diferenciar, dentro de cada una de dichas alineaciones, zonas con diferencias relativas en su rigidez, que pueden determinarse, además, a una velocidad de avance considerable.

3.2.1. Portancemètre

Este equipo, cuyo nombre se ha traducido en lengua española como portancímetro es, de nuevo, un desarrollo francés del "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées", que viene utilizándose en aquél país desde finales de la década de los noventa.

El portancímetro requiere un vehículo automóvil que actúa como elemento tractor y un remolque convencional donde se aloja

el equipo de medición propiamente dicho, que consiste básicamente en una rueda de un metro de diámetro y cuatrocientos kilogramos de masa ($2r = 1 \text{ m}$, $m = 400 \text{ kg}$). Incluye una excéntrica que imprime una vibración a la rueda de treinta y cinco hercios (35 Hz). La fuerza de reacción la proporciona una masa suspendida de seiscientos kilogramos ($M_s = 600 \text{ kg}$).

Para la obtención del módulo de rigidez se determina la fuerza total aplicada sobre el terreno y la deformación (asiento) experimentado por éste, lo que se conoce por medio de un acelerómetro alojado en el eje de la rueda.

Estos datos se tratan a través de un programa específico. La aplicación informática devuelve un gráfico cuasi continuo en el que se representa el valor del módulo (MPa) en función de la distancia al origen de la medición (m).

Según el fabricante, el rango de medición para el módulo obtenido con su propia sistemática, se sitúa entre treinta y trescientos megapascals ($30 \leq E_p \text{ (MPa)} \leq 300$) y la profundidad representada es la comprendida entre la superficie del terreno y unos

sesenta centímetros (60 cm).

Presenta, frente a los equipos de caracterización puntual, la ventaja de proporcionar un registro que puede considerarse continuo en la práctica, de un parámetro relacionado con la rigidez del terreno, por lo que a priori pueden detectarse zonas heterogéneas pertenecientes a una misma tongada.

El rendimiento de la medición se aproxima a la marcha de una persona andando, los propios fabricantes lo estiman en unos quince kilómetros (15 km) de alineación por jornada de trabajo como media y hasta en veinte (20 km) como punta.

3.2.2. Instrumentación de compactadores

La instalación de acelerómetros sobre la masa vibrante del tambor de un compactador permite conocer fuerzas y desplazamientos en el mismo, pudiendo obtenerse a partir de estos parámetros, al igual que en los casos anteriores, valores representativos de la rigidez del terreno.

El valor de este módulo puede conocerse en tiempo real por el operario del compactador, mediante un equipo informático dotado de una pantalla instalada en la cabina que integre los datos de los acelerómetros y le proporcione, de forma instantánea, el valor de la rigidez en cuestión.

Puede fijarse como objetivo del proceso de compactación la obtención de un determinado módulo dinámico, por lo que el operario, una vez obtenido éste, dejaría de efectuar pasadas de rodillo sobre una alineación o ubicación concreta en su caso.

Todo ello puede complementarse con la instalación de un equipo GPS en el compactador, lo que permite, mediante un desarrollo informático relativamente sencillo, la superposición de los valores de las coordenadas, el número de pasadas efectuadas y el módulo dinámico obtenido.

4. Conclusiones

Se han descrito someramente los procedimientos y las potencialidades de una serie de equipos que, aunque de diversas maneras, permiten la obtención de paráme-

tros con ecuaciones de dimensión de módulo de elasticidad (unidades de presión), a través de los que puede tratar de acometerse el control de ejecución de determinados aspectos relacionados con la compactación de rellenos tipo terraplén.

Los equipos analizados, presentes todos ellos en el mercado español, permiten la obtención de valores de este módulo "dinámico" dentro de unos determinados rangos teóricos de aplicabilidad. Debe tenerse en cuenta que los módulos proporcionados por cada equipo no son equiparables y que permiten la caracterización de puntos concretos o bien de alineaciones.

Todos ellos resultan sumamente atractivos a priori, presentando como principal ventaja frente al control de la deformabilidad de las tongadas por procedimientos tradicionales (mediante placa estática), su versatilidad. Aun en el caso de emplear varios de estos sistemas de forma complementaria, paralela o reiterativa, se obtienen rendimientos superiores a los habituales con la mencionada sistemática tradicional.

Sus inconvenientes se centran, por el momento, en los siguientes aspectos:

- Dificultad de establecer correlaciones fiables entre los valores estáticos y dinámicos, y aun de estos últimos entre sí.
- Falta de experiencia de uso de estos equipos en nuestro país: la aplicación no ya de correlaciones, sino de valores directos de módulos que permitan la aceptación de la tongada debe partir, necesariamente, de una experiencia importante en el uso de cada uno de estos equipos.
- Dependencias tecnológica del fabricante y comercial de la empresa que ejerce su representación en España.

Asimismo, habría que tener en cuenta las limitaciones e incertidumbres del propio ensayo de partida (placa estática) que presenta una gran dificultad en su in-

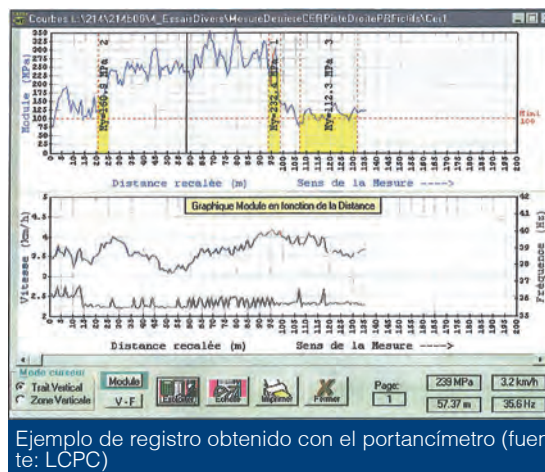
terpretación, desde su relativamente escasa repetibilidad, a la profundidad de afección real, pasando por la influencia de los parámetros de estado y demás características del suelo en cuestión.

En cualquier caso, la adquisición de mayor experiencia en el empleo de estos equipos de alto rendimiento, o de otros diferentes que en su caso que persigan el mismo fin, se considera de gran interés para la mejora de los procedimientos de control de ejecución de los rellenos tipo terraplén.

5. Bibliografía y Normas de Ensayo

Bibliografía

- ADAM C., ADAM D., KOPF F., PAUL-MICHL I.: *Computational validation of static and dynamic plate load testing*. Acta Geotechnica, vol 4, nº 1, pp 35 - 55, (2009).
- BRIAUD, JEAN LOUIS: *Intelligent Compaction: An Overview*. Universidad Texas A&M (2003).
- DE HITA ALONSO, JOAQUÍN; SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, FERNANDO: *Utilización de la placa de carga dinámica para la recepción de explanadas*. Revista Rutas nº 107 (marzo - abril 2005).
- HUMBOLDT MFG CO: *Geogauge. User Guide* (2007).
- MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (Francia): *Le portancemètre. Mesure continue de la portance des plates formes* (2004).
- MOREL, GUY; QUIBEL, ALAIN: *Le portancemètre. Un nouvel appareil*



Ejemplo de registro obtenido con el portancímetro (fuente: LCPC)

d'auscultation en continu des couches de forme et de la partie supérieure des terrassements.

Revue Générale des Routes et des Aérodrômes nº768 (diciembre 1998).

- SANTIAGO RECUERDA, EDUARDO; GARCÍA DE LA OLIVA, JOSÉ LUIS; GONZÁLEZ PANIAGUA, PEDRO: *Comparación de diferentes métodos de control de compactación del subbalasto*. Jornadas hispano-portuguesas sobre geotecnia en las infraestructuras ferroviarias (CEDEX 2009).
- SIEKMEIER J., PETERSON D., NELSON C., PETERSON R: *Intelligent Soil Compaction Technology, Results and Roadmap toward Widespread Use*. Transportation Research Board, Washington DC, EEUU (reunion anual nº 85, 2006).

Normas de ensayo

Españolas

- UNE 103807 Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica.
 - Parte 1: Placa rígida, diámetro $2r = 600$ mm, método 1.
 - Parte 2: Placa rígida, diámetro $2r = 300$ mm, método 2.
- UNE 103808 Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática.

Francesa

- XP P 94 105 Sols : Reconnaissance et essais. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable - Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre Exploitation des résultats - Interprétation. ❖



Vista general del portancímetro (fuente: LCPC)