

Equipos de auscultación dinámica para obras de tierra

ROBERTO ÁLVAREZ DE SOTOMAYOR (*)

RESUMEN El presente artículo recoge algunos de los equipos dinámicos de auscultación más representativos que actualmente se encuentran disponibles en España para el control de compactación en obras de tierra. Junto a la descripción de cada equipo se desarrolla una aproximación al cálculo del módulo de deformación para cada uno de ellos. Se ha llevado a cabo una revisión de la normativa actual a nivel nacional y europeo, y se han remarcado aquellos trabajos de investigación que se han realizado en nuestro país sobre la utilización de estos equipos para el control de calidad en obras de tierra. Adicionalmente se analizan algunas variables que influyen en la obtención de los módulos de deformación y se ofrece la posibilidad de comparar estos con un ensayo de laboratorio de referencia.

DYNAMIC MONITORING EQUIPMENTS FOR EARTHWORKS AND SUBGRADES

ABSTRACT *This paper take into account some dynamic auscultation equipments that currently are available in Spain for compaction quality control on earthworks and subgrades. Closed to the equipments description, a deformation modulus calculus approximation has been developed for each of them. A standards checking has been made from national and European point of view. Some important research works that have been developed in our country about dynamic monitoring equipments, for quality control in earthworks, has been mentioned. In addition to this, some variables are analyzed which have an influence on deformation modulus calculi and a possibility for comparing the equipment modulus calculated with a reference laboratory test has been offered.*

Palabras clave: Equipos de auscultación dinámica, Obras de tierra, Capacidad de soporte, Módulo de deformación resiliente.

Keywords: Dynamic auscultation equipments, Earthworks, Bearing capacity, Resilient modulus.

1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX, prácticamente todo valía para formar un relleno de una carretera o ferrocarril, incluido su procedimiento de construcción con tal de conseguir el volumen proyectado. Una vez comenzó a desarrollarse la mecánica de suelos, se empezó a valorar que los suelos se comportaban de manera diferente en función de su procedencia. A medida que se ampliaban conocimientos comenzaron a establecerse limitaciones, en cuanto a la utilización de materiales y a procedimientos de ejecución.

Desde entonces hasta hoy se han ido desarrollando poderosos métodos de excavación, transporte y compactación que se emplean a nivel mundial y que permiten ejecutar enormes desmontes y construir terraplenes de hasta 100 metros de altura. Progresivamente, conforme se ha implementado la calidad de estas obras de tierra, algunos de los métodos de control in situ se han ido quedando atrás, de forma que no son

capaces de seguir el ritmo constructivo si el proyecto es de tamaño considerable, a menos que estos ensayos de control se reduzcan en número por unidad de volumen o bien que se dispare de varias unidades de control, lo que dispara el coste.

En España desde el año 1976 está en vigor el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), aunque actualizado mediante la Orden FOM/1382/02 en su artículo 330 Terraplenes se especifican distintos tipos de suelos a utilizar en las diferentes zonas del terraplén así como los métodos de control in situ de la compactación. La Orden FOM/3460/2003 por la que se aprueba la Norma 6.1-IC Secciones de Firme, define diferentes categorías y secciones de explanada en función de los suelos descritos en los artículos 330 y 512 (Suelos estabilizados) del PG-3.

El método de densidad in situ por el método de la arena se sustituyó hace ya unos años por los densímetros de tipo nuclear, que es un método mucho más rápido y está ya recogido en el PG-3. En la norma 6.1-IC (2003) se hace referencia a la deflexión patrón máxima de las explanadas mediante equipos dinámicos de auscultación tipo deflectómetro, en su apartado 5.1 (Formación de la Explanada). En el apartado 3.3.2 (Categoría de explanada) de la Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (Num.5930/12.01.2009) se hace referencia a

(*) Licenciado en Geología. Master Universitario en Ingeniería Geológica y Geotecnia. Investigador del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Roberto.Alvarez@cedex.es

la utilización de deflectómetros de impacto para la clasificación de las explanadas fijando la carga máxima del equipo a 49 kN sobre una placa rígida de acero de diámetro 300 mm.

Los métodos clásicos de control, como la placa de carga estática, siguen siendo métodos fiables y efectivos, aunque lentos y por tanto caros. Hoy día se han desarrollado varios métodos de control dinámico en obras de tierra que permiten realizar una auscultación in situ de forma rápida, fiable y económica. Además estos métodos dinámicos proporcionan una aproximación a la realidad, puesto que las cargas a las que se someten una explanada o un terraplén al paso de los vehículos duran unos milisegundos.

En Francia el manual de diseño para estructuras de firmes "Conception et dimensionnement des structures de chaussée-Guide technique" tiene en cuenta la utilización de la placa dinámica de carga tipo Dynaplaque para cuantificar la capacidad de soporte en terraplenes. De manera similar, Alemania contempla en varios pliegos técnicos la utilización de la placa de carga dinámica ligera para la obtención de la capacidad de soporte en distintos tipos de suelos en carreteras y ferrocarriles, como los pliegos ZTVE-StB 94, ZTVE-StB 95, ZTVA-StB 97 ZTVT-StB 95 y NGT-39.

2. EQUIPOS DINÁMICOS

Los equipos dinámicos de auscultación se caracterizan por la caída libre de una masa sobre un elemento amortiguador de rigidez conocida que transmite la carga sobre una placa rígida de acero de morfología circular. La predecesora de estos equipos dinámicos, sin duda, ha sido la placa de carga estática, no obstante los equipos dinámicos se caracterizan por que el tiempo de aplicación de la carga es muy pequeño en comparación con aquella, ya que la aplicación de la carga como mucho no supera unas pocas decenas de milisegundos.

Estos sistemas dinámicos utilizan células de carga para cuantificar la fuerza aplicada, que en función de su magnitud transmite una señal eléctrica con una diferencia de potencial determinada, que interpretada por un programa informático es convertida a unidades de fuerza.

Para la medición de los asientos producidos durante el impacto de la masa de caída libre se utilizan acelerómetros, sísmómetros y geófonos que miden la aceleración, el desplazamiento y la velocidad de la máxima vibración producida en el suelo por el impacto. Mediante un programa informático que realiza funciones de integración se obtiene el valor en unidades de longitud del espacio recorrido, es decir, la deflexión.

A continuación, son descritos varios de los equipos más utilizados para la auscultación de obras de tierra.

2.1. DYNAPLAQUE II

La Placa de Carga Dinámica es un generador de impulsos, que aplica sobre el terreno una carga dinámica, similar en intensidad y duración a la que provocaría el paso de un eje de 13 t a una velocidad de 60 km/h, por medio de una masa que cae sobre una placa de carga de diámetro 600 mm, Figura 1. Este equipo ha sido desarrollado por el LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). El ensayo se realiza siguiendo la **NORMA UNE 103807-1: 2005** "Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica. Parte 1: Placa rígida, diámetro 2r=600 mm, Método 1".

Para la determinación del módulo de compresibilidad bajo carga dinámica con el equipo *Dynaplaque II*, una vez localizado el punto de auscultación, se aplican tres cargas dinámicas sucesivas, de intensidad y duración definida, por medio de la caída libre de una masa sobre la placa, realizándose entonces la medición directa de la fuerza (kN) y de la deformación (mm), Figura 2.

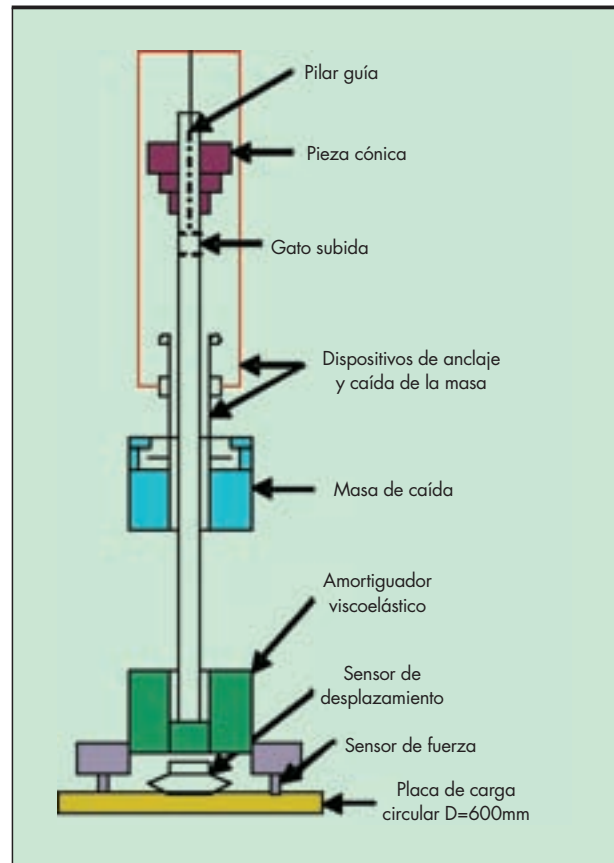


FIGURA 1. Esquema de funcionamiento de la Dynaplaque II.

La deflexión del terreno y la fuerza del impacto se miden por unos sensores instalados en la placa (célula de carga y acelerómetro). La combinación de estos dos parámetros permite calcular directamente el módulo de compresibilidad bajo carga dinámica en el punto de ensayo.

El valor de este módulo de compresibilidad bajo carga dinámica E_{vd} está relacionado con la rigidez, K , del resorte de interacción suelo/base de la placa mediante la relación del semi-espacio elástico indefinido de Boussinesq:

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

La rigidez del suelo k , 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:

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

Siendo:

E_{vd} : Módulo de compresibilidad bajo carga dinámica.

ν : Coeficiente de Poisson $\approx 0,5$.

r : Radio de la placa de carga.

K : Rigidez del suelo.

m : Masa de la placa de carga.

c : Coeficiente de amortiguamiento del suelo.

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

$z(t)$: Asiento de la placa de carga en función del tiempo.



FIGURA 2. Dynaplaque II en funcionamiento.

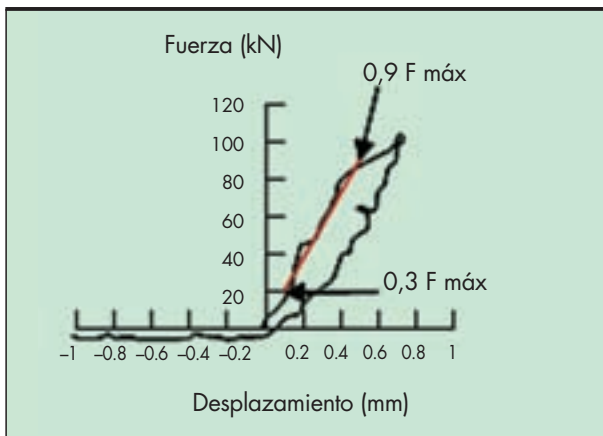


FIGURA 3. Ejemplo de cálculo del módulo dinámico realizado por el equipo Dynaplaque II.

En los ensayos, el módulo dinámico del suelo se calcula mediante una regresión lineal en la curva fuerza-desplazamiento en la fase de carga y entre los valores correspondientes al 30 y 90% de la fuerza máxima, Figura 3.

De esta forma el módulo dinámico obtenido durante el ensayo con la Dynaplaque II se calcula mediante la expresión:

$$E_{vd} = \frac{1,5 \times \frac{F}{S} \times R}{d} = \frac{F}{d} \times \frac{1,5 \times R}{S}$$

Donde:

E_{vd} : Módulo dinámico.

R : Radio de la placa de carga.

F : Fuerza aplicada.

S : Superficie de la placa de carga.

d : Deflexión.

El valor máximo de la fuerza producida es de 70 kN y la duración de la aplicación de la carga es de 0,015 s. El rango de medida del módulo de deformación vertical bajo carga dinámica está comprendido entre 20 MPa y 250 MPa.

2.2. PLACA DE CARGA LIGERA ALEMANA

La placa de carga dinámica de 300 mm es un equipo ligero que utiliza una maza de accionamiento manual como elemento de carga, una barra guía y un elemento amortiguador sobre el que golpea la maza que transmite la carga a una

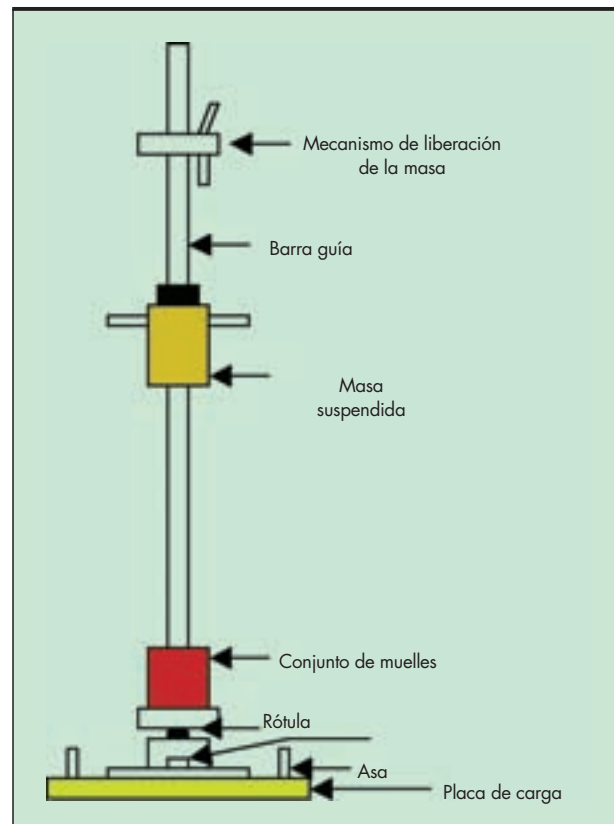


FIGURA 4. Esquema de funcionamiento de la placa ligera alemana.



FIGURA 5. Ejecución de ensayo de la placa ligera alemana.

placa rígida de acero de diámetro 300 mm. El equipo consta de un dispositivo electrónico de medida de los movimientos de la placa, de un acelerómetro para la medida de asientos y de un equipo electrónico de registro y cálculo de datos que almacena el módulo de deformación dinámico E_{vd} calculado, Figura 4. Este equipo ha sido desarrollado por HMP Magdeburger Prüfgerätebau GmbH. El ensayo se realiza siguiendo la **NORMA UNE 103807-2:2008** "Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica". Parte 2: Placa rígida, diámetro $2r=300$ mm, Método 2°.

El ensayo debe ser precedido por tres impactos preliminares para asegurar un perfecto contacto placa-suelo. La maza cae libremente desde una altura calibrada y se captura y sujeta después de cada impacto, Figura 5.

Después de que el dispositivo electrónico de lectura de medidas haya sido encendido, la maza se suelta tres veces, y los asientos resultantes de los tres impactos son medidos. Se debe cuidar que la maza caiga exactamente desde la altura especificada y se capture después de cada impacto.

El módulo dinámico de deformación E_{vd} se calcula mediante la siguiente ecuación, siendo función del máximo esfuerzo vertical bajo la placa de carga σ_{max} , del radio de la placa de carga y del valor medio de la deflexión máxima S_{max} de los tres asientos medidos, Figura 6.

$$E_{vd} = 1,5 \times r \times \frac{\sigma_{max}}{S_{max}}$$

El valor máximo de la fuerza producida es de 7,07 kN y la duración de la aplicación de la carga es de 0,017 s. El rango de medida del módulo de deformación vertical bajo carga dinámica está comprendido entre 15 MPa y 70 MPa.

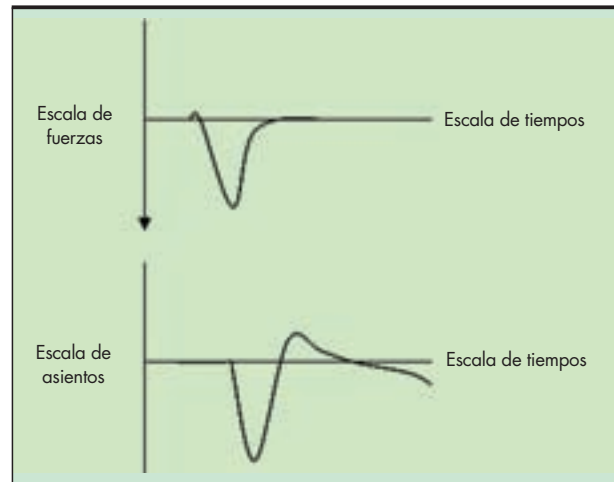


FIGURA 6. Ejemplo de cálculo del módulo dinámico realizado por la placa ligera alemana.

2.3 PORTANCÍMETRO

El Portancímetro está compuesto de una rueda rígida de acero de 600 kg de masa (masa vibrante) con una excéntrica en su interior que realiza un movimiento circular perpendicular a la superficie a analizar y en sentido contrario al avance del vehículo produciendo un momento de excentricidad (M_e) de 0,30 mkg. La cadencia es de 35 ciclos por segundo (± 3 Hz) y el equipo se desplaza a una velocidad de 3,50 km/h, lo que permite la realización de un ensayo cada 0,80 m (1250 medidas por kilómetro), llegando a auscultar aproximadamente 20 km por jornada de trabajo, Figura 7.

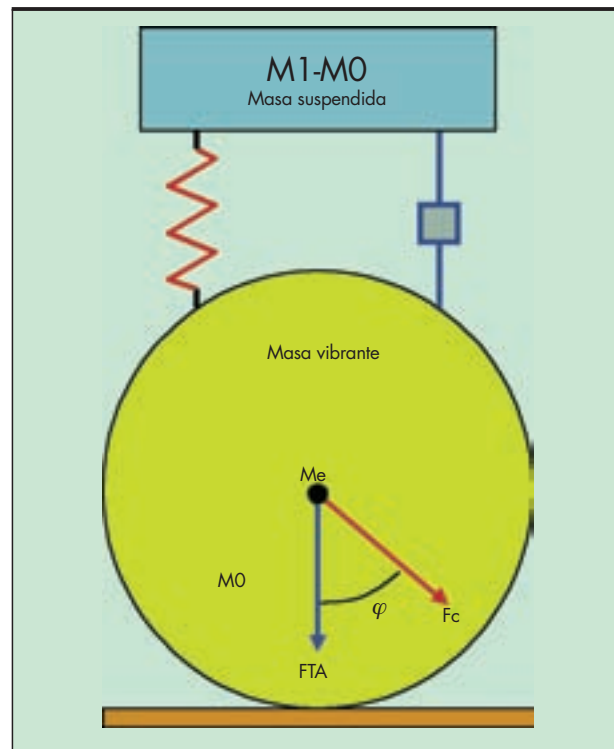


FIGURA 7. Esquema de funcionamiento del portancímetro.



FIGURA 8. Ejecución de ensayo con el equipo portancímetro.

Los datos son registrados de forma automática siempre que la velocidad no sea inferior o superior a unos parámetros preestablecidos ($3,20 \text{ km/h} < \text{velocidad de medida} < 3,80 \text{ km/h}$), al igual que la frecuencia de vibración de la rueda ($32 \text{ Hz} < \text{velocidad de vibración} < 38 \text{ Hz}$), así mismo, la profundidad de la huella dejada por la rueda (asiento) debe ser inferior a 2 cm.

El Portancímetro posee una masa suspendida de 400 kg que sirve como reacción para realizar la "carga" del terreno a auscultar, la fuerza se aplica mediante la rotación de la masa excéntrica, que produce un desplazamiento en la rueda de 0,50 mm, Figura 8, (la rueda llega a elevarse del suelo y realiza aproximadamente 35 pequeños impactos por segundo en la superficie del suelo). Este equipo ha sido desarrollado por el LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Para poder calcular el Módulo del terreno es necesario conocer la fuerza que se aplica sobre la explanada y la deforma-

ción que esta sufre, para la obtención estos parámetros se aplican las expresiones siguientes:

$$FTA = M_1 \times g + M_0 \times a_1 + (M_1 - M_0) \times a_2 + (m \times e \times \omega^2 \times \cos \varphi)$$

Siendo:

FTA : Fuerza total aplicada.

M_1 : Masa total = 1000 kg.

M_0 : Masa rueda vibrante = 600 kg.

g : Aceleración de la gravedad.

a_1 : Aceleración excéntrica (se mide por acelerómetro).

a_2 : Aceleración chasis (se mide por acelerómetro).

$$F_c = m \times e \times \omega^2 \times \cos \varphi; \quad \varphi = \omega \times t$$

Siendo:

F_c : Valor fuerza centrífuga aplicada perpendicular a la superficie.

m : Valor de la masa excéntrica.

e : Distancia del centro de gravedad de la masa al eje de rotación.

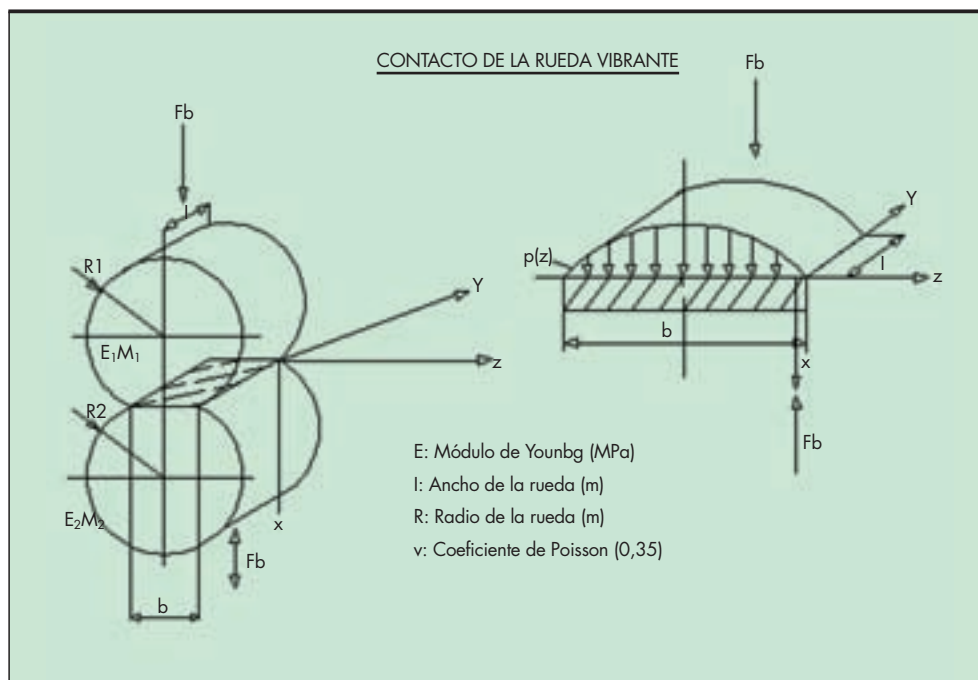
ω : Velocidad angular.

φ : Ángulo de la masa excéntrica con respecto a la vertical.

t : Tiempo.

El asiento que sufre el terreno al aplicarle la fuerza se obtiene por una medida indirecta del mismo, es decir, a partir de la aceleración medida por el acelerómetro ubicado en el eje de la rueda excéntrica y realizando una doble integral (aceleración $\rightarrow$ velocidad $\rightarrow$ desplazamiento) se obtienen los valores del asiento a lo largo de un ciclo en pequeños intervalos de tiempo, Figura 11.

Hertz en 1895 y posteriormente Lundberg en 1939, Figuras 9 y 10, establecieron la relación entre la carga producida por un rodillo y el área afectada por la aplicación de la carga del rodillo en un semiespacio elástico. La solución puede utilizarse para encontrar la relación entre la rigidez K_B y el módulo de deformación E de un suelo bajo una rueda, de forma que sirve de aproximación teórica al cálculo realizado por el portancímetro.



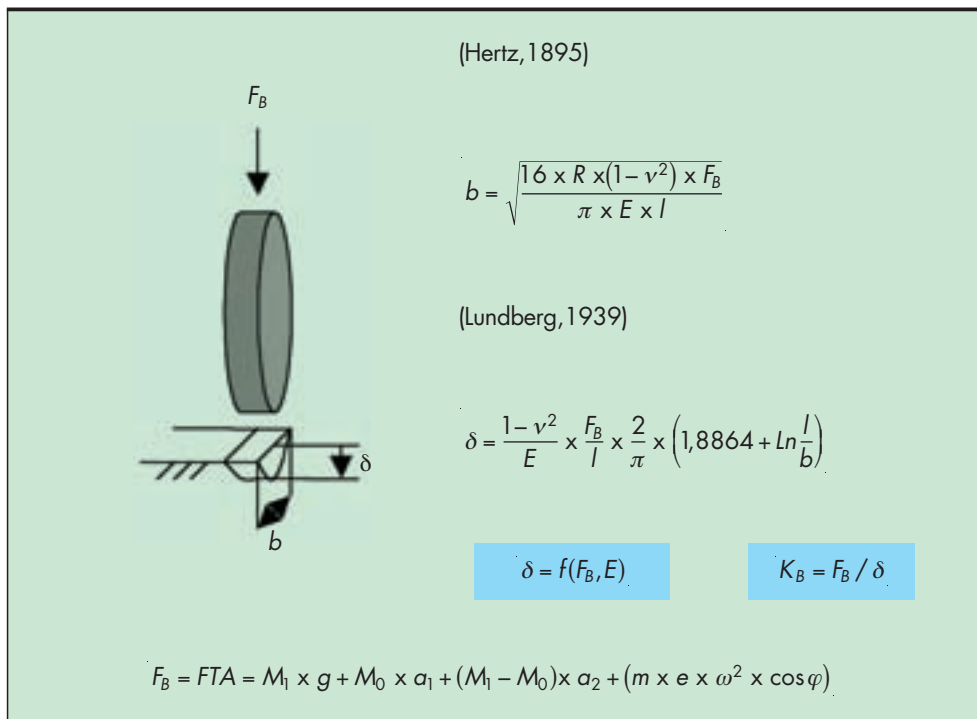


FIGURA 10. Esquema de la deflexión y el área afectada por el portancímetro.

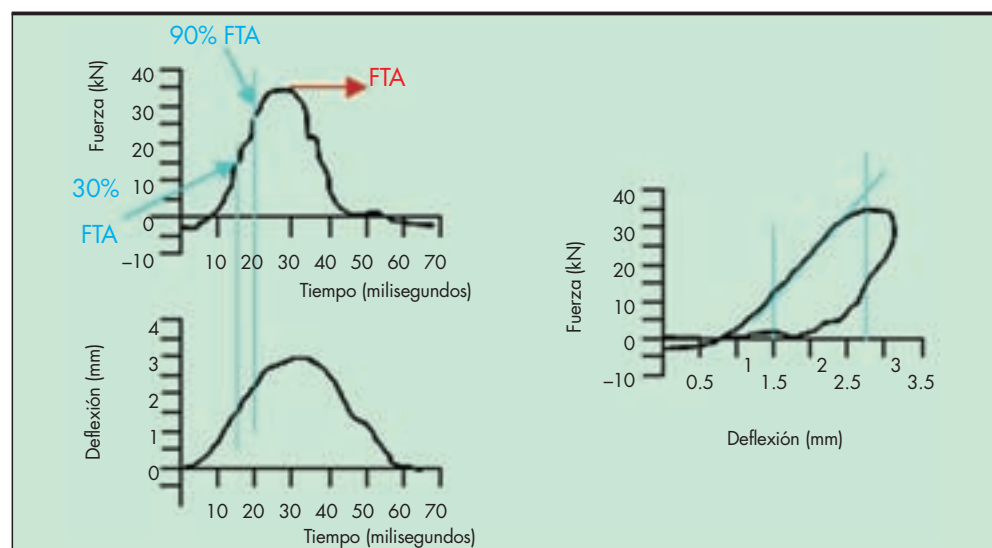
$$K_B = \frac{E \times L \times \pi}{2 \times (1 - \nu^2) \times \left(2,14 + \frac{1}{2} \times \ln \left[\frac{\pi \times L^3 \times E}{(1 - \nu^2) \times 16 \times ((M_1 - M_0) + M_0) \times R \times g} \right] \right)} \quad (\text{MN/m})$$

Donde L es el ancho de la rueda vibrante, es el coeficiente de Poisson, Ln es el logaritmo neperiano, $(M_1 - M_0)$ y M_0 son la masa suspensa (bastidor) y la masa de la rueda vibrante, R es el radio de la rueda vibrante y g es la aceleración de la gravedad. Luego conociendo la rigidez K_B se obtiene el módulo de deformación dinámico E del suelo. En los ensayos, este módulo dinámico del suelo se calcula mediante una regresión lineal en la curva fuerza-desplazamiento en la fase de carga y entre los valores correspondientes al 30 y 90% de la fuerza máxima.

2.4. DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO

El principio general de funcionamiento de los deflectómetros de impacto se basa en la generación de un impulso de carga sobre un firme para medir su deformación, Figuras 12 y 13. El impulso se consigue mediante el impacto provocado por la caída libre de una masa sobre un sistema de amortiguación instalado sobre una placa de carga circular de 0.3 m de diámetro. La masa m (kg), el sistema de amortiguación k (MN/m) y la altura de caída h (m) pueden regularse para obtener la carga de impacto deseada sobre el firme. Una serie de sensores miden las deflexiones verticales máximas o las ondas de deformación de la explanada bajo el centro de la placa de carga y a distintas distancias de este centro. El ensayo se realiza siguiendo la

FIGURA 11. Esquema de cálculo del módulo de deformación dinámico realizado por el portancímetro.



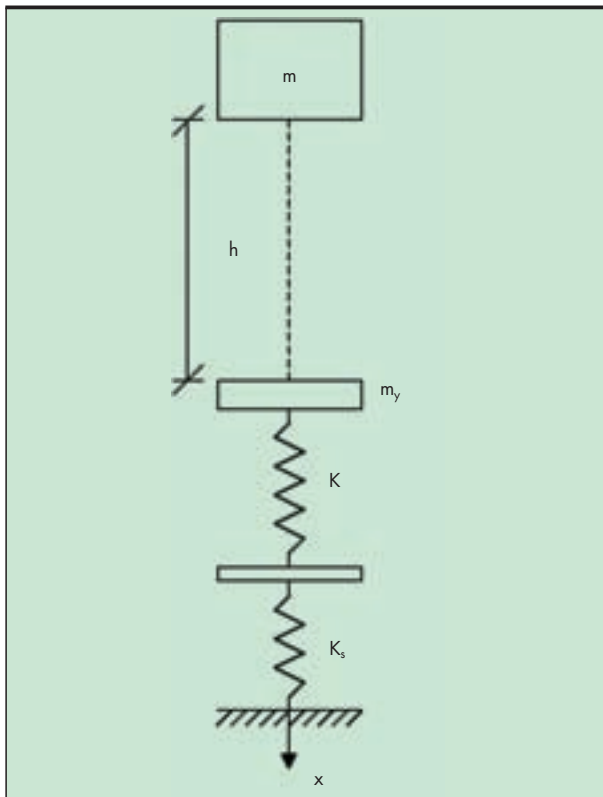


FIGURA 12. Esquema general de funcionamiento del deflectómetro de impacto.



FIGURA 13. Fotografía del equipo deflectómetro de impacto KUAB 150.

NORMA NLT 338: 2007. “Medida de deflexiones en firmes con el deflectómetro de impacto”.

Se considera que entre el resorte y la masa de caída existe otra masa m_y que recibe el golpe de la masa que cae, teniendo en cuenta que la rigidez de la explanada sobre la que apoya la placa se denomina K_s (N/m) y aplicando las leyes de la mecánica clásica, se puede obtener el valor de la fuerza F , en N, transmitida por la placa a la explanada como función del tiempo.

$$F = F_d \times \sin(\omega \times t) + F_e \times (1 - \cos(\omega \times t));$$

$$F_d = \sqrt{2 \times \beta \times h \times k \times m \times g}; (N)$$

$$F_e = \alpha \times m \times g; (N)$$

$$\alpha = \frac{m + m_y}{m};$$

$$\beta = \frac{K_s}{K_s + K};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\beta \times K}{\alpha \times m}}; (\text{rad} / \text{seg})$$

$$g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2;$$

El tiempo aproximado $T_{\max}$ (s) para alcanzar la carga máxima $F_{\max}$ (N) es:

$$T_{\max} \approx \frac{\pi}{2} \times \sqrt{\frac{\alpha \times m}{\beta \times k}};$$

$$F_{\max} \approx F_d + F_e;$$

Donde:

F_d Es la componente dinámica de la fuerza.

F_e Es la componente estática.

El módulo de deformación dinámico bajo la placa de carga se calcula teniendo en cuenta la máxima deflexión existente bajo la placa de carga δ_0 , la máxima presión ejercida bajo la placa de carga σ_0 , el coeficiente de Poisson ν del material en cuestión y el radio de la placa de carga r mediante la expresión:

$$E_0 = \frac{2 \times (1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times r}{\delta_0}$$

El módulo de deformación dinámico a profundidad equivalente $h_e = r$ (siempre mayor de $2a$) se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$E_0(r) = \frac{(1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a^2}{r \times \delta_r}$$

Donde:

E_0 : Módulo de superficie en el centro de la placa de carga (MPa).

$E_0(r)$: Módulo de superficie a la distancia r (MPa).

ν : Coeficiente de Poisson.

σ_0 : Esfuerzo de contacto bajo placa de carga (kPa).

a : Radio de la placa de carga (mm).

r : Distancia del sensor al centro de la carga (mm).

δ_r : Deflexión a la distancia r (μm).

Los deflectómetros de impacto pueden presentar detalles de diseño diferentes dependiendo del fabricante. Debido a ello la forma del impulso de carga que generan puede resultar también diferente. La rigidez de una capa de material depende de la velocidad de aplicación de la carga y por tanto la respuesta del material es función de la forma del impulso de carga aplicado. Puesto que el impulso de carga generado por el deflectómetro pretende simular el originado por el paso de un vehículo en movimiento, debería tener un intervalo entre

el origen y el máximo de carga próximo al de dicho impulso. La mayoría de los deflectómetros de impacto generan un impulso de carga con un intervalo entre el origen y el máximo de carga de 5 a 30 milisegundos y con una duración total entre 20 y 60 milisegundos.

Generalmente estos equipos además de facilitar los datos de deflexión facilitan los módulos de deformación, si no fuera el caso, los módulos de deformación de las distintas capas se pueden calcular mediante un programa de cálculo inverso en el que hay que tener en cuenta los espesores de las capas, sus coeficientes de Poisson, sus deflexiones y la carga aplicada además del radio de la placa de carga.

Aunque el diseño inicial de los deflectómetros de impacto es para el análisis de pavimentos mediante los cuencos de deflexión a través de un número variable de sensores dispuestos en línea, las experiencias llevadas a cabo por el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX con estos equipos en núcleos de terraplén y explanadas son netamente satisfactorios en lo que se refiere a la capacidad de soporte de suelos.

Inclusive ya existen fabricantes que han puesto en el mercado equipos portátiles versátiles, esto es, capaces de funcionar independientemente tanto en pavimentos como en obras de tierra. A continuación se describen los cuatro equipos de deflectómetro de impacto con los que cuenta el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.

2.4.1. DEFLECTÓMETRO LIGERO DYNATEST

El deflectómetro de impacto ligero es un equipo de auscultación manual de fácil transporte, está basado en un sistema masa-muelle-placa rígida. La masa de caída que produce la carga es de accionamiento manual pudiéndose utilizar dos configuraciones distintas de 10 y de 15 kg, con opción de una tercera hasta 20 kg, permitiendo generar una carga de pico de hasta 15 kN, Figuras 14 y 15. La duración del pulso de carga oscila entre 15 y 30 milisegundos. Respecto al diámetro de la placa de carga existen tres posibilidades, 100, 150 y 300 mm que se alternan con un simple sistema manual. La resolución del nivel de carga y de la deflexión es de 0,1 kN y de 1 μm respectivamente.

Este equipo dispone de tres geófonos para las medidas de deflexión, uno central dispuesto en el centro de la placa y otros dos geófonos adicionales cuya posición se puede regular en longitud hasta un máximo de 60 cm al centro de la placa.



FIGURA 14. Fotografía del deflectómetro de impacto ligero Dynatest.

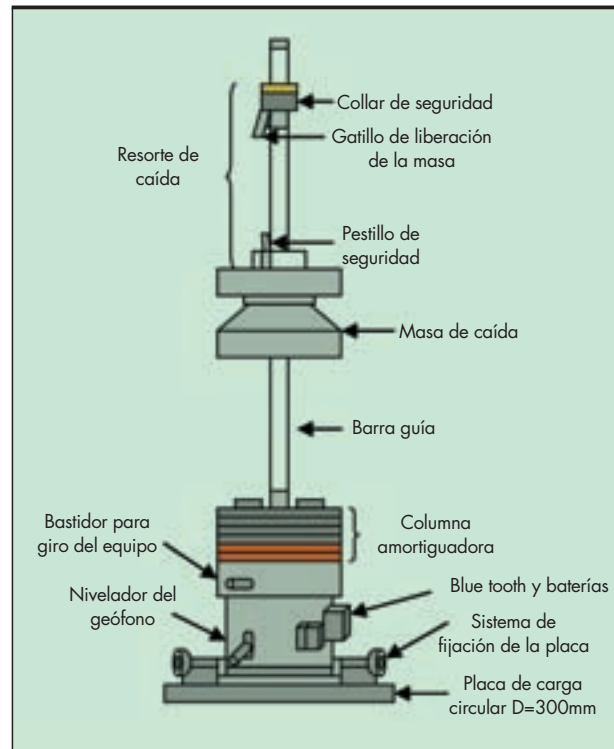


FIGURA 15. Esquema de funcionamiento del deflectómetro de impacto ligero Dynatest.

El equipo se conecta a través de una red inalámbrica tipo "Bluetooth" a una PDA mediante la cual puede dirigirse y controlarse el ensayo de forma sencilla.

El software del equipo permite registrar todos los datos necesarios del ensayo facilitando en todo momento las gráficas de la deflexión y la carga además del valor del módulo de deformación dinámico obtenido en la capa auscultada.

2.4.2. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD KUAB 150

La onda de carga simula la producida por un vehículo circulando a 70 km/h. El tiempo de carga se puede variar entre 40 y 60 milisegundos. La carga máxima equivalente se puede variar dependiendo del tiempo en alcanzar el pico máximo, este tiempo se puede seleccionar entre dos valores:

La carga de carga de acero tiene un diámetro de 300 mm y se encuentra segmentada en cuatro partes, además lleva incorporada una placa de goma intermedia de 20 mm, esta placa de goma es acanalada para asegurar su deformación. El equipo dispone de una placa de acero adicional de diámetro 450 mm.

La carga máxima equivalente proporcionada por el equipo es de 150 kN con una resolución de 0,1 kN y una duración del impulso de carga de entre 40 y 60 milisegundos. Este equipo se caracteriza por presentar 7 sensores de deflexión tipo sísmómetro con una resolución de 1 μm . Adicionalmente incorpora dos sensores térmicos, uno ambiente y el otro de superficie, Figura 16.

2.4.3. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD KUAB 50

Es un modelo más antiguo que el anterior, Figura 17. La placa de carga de acero tiene un diámetro de 300 mm diámetro y se encuentra segmentada en cuatro partes. La carga máxima equivalente es de 65 kN con una resolución de 0,1 kN y



FIGURA 16. Fotografía del deflectómetro de impacto modelo KUAB 150.



FIGURA 17. Fotografía del deflectómetro de impacto modelo KUAB 50.

una duración del impulso de carga de entre 30 y 40 milisegundos. Este equipo se caracteriza por presentar 5 sensores de deflexión tipo sismómetro con una resolución de $1\ \mu\text{m}$. Adicionalmente incorpora dos sensores térmicos, uno ambiente y el otro de superficie.

2.4.4. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD DYNATEST

Mediante un sistema hidráulico el equipo eleva la masa de impacto, que mediante caída libre produce la carga a transmitir mediante una placa de acero rígida segmentada, de 300 o 450 mm, sobre la sección de firme, la carga producida es función del número de pesas dispuestas en el equipo y de la altura de caída de las mismas.

La masa de caída máxima del equipo es de 350 kg, siendo la mínima de 50 kg produciendo un intervalo de carga de entre 1 y 120 kN transmitiendo un esfuerzo para una placa de acero de 300 mm de diámetro de 14 y 1.700 kPa respectivamente. La carga máxima equivalente es de 120 kN con una resolución de 0,1 kN, la duración del impulso de carga oscila entre 25 y 30 milisegundos.

Las deflexiones producidas en el firme o suelo auscultado son captadas mediante distintos geófonos dispuestos en diferentes posiciones con respecto al área de aplicación de la carga. La disposición de los geófonos ofrece diferentes configuraciones para un número máximo de catorce sensores de deflexión, dispuestos de forma longitudinal al eje del remolque a diferentes distancias, aunque también permite colocar dos geófonos de forma transversal. Actualmente está configurado con once geófonos dispuestos nueve de ellos longitudinalmente a una distancia del centro de la paca de 0, 300, 450, 600, 900, 1.200 y 1.500 mm hacia la parte delantera del remolque y otros dos dispuestos hacia la parte trasera a -300 y -450 mm. Adicionalmente existen otros dos geófonos en posición transversal al eje a 300 y -300 mm respectivamente. Este equipo consta de dos sensores térmicos, uno aéreo y otro de superficie.

Además el equipo dispone de un encoder que permite registrar la distancia de cada punto de ensayo desde el origen. Ofrece además la posibilidad de realizar distinto número de golpes con diferentes configuraciones de carga para un mismo punto a auscultar, Figura 18.



FIGURA 18. Fotografía del deflectómetro de impacto FWD Dynatest.

3. CONCLUSIONES

Durante los últimos treinta años el desarrollo de las nuevas tecnologías por parte de entidades públicas y privadas a nivel mundial, ha posibilitado la puesta en el mercado de equipos dinámicos de auscultación para obras de tierra. Actualmente son varios los países y los equipos disponibles en el mercado por lo que se hace necesario la evaluación de los mismos y la redacción de pliegos técnicos que contemplen su utilización para cuantificar las capacidades de soporte en diferentes partes de las obras de tierra.

Desde un punto de vista del control de calidad en las obras de tierra, los equipos dinámicos proporcionan una interesante opción, ya que son capaces de auscultar superficies grandes en periodos de tiempo relativamente pequeños, en consonancia con los grandes volúmenes de tierra que pueden ser ejecutados hoy día en diferentes tipologías de proyecto.

Interesantes estudios entre el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y el Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) han sido llevados a cabo, comparando diferentes métodos dinámicos de control de la compactación del subbalasto.

Durante los últimos años diversos autores han intentado establecer correlaciones entre los módulos de deformación obtenidos con diferentes equipos sobre distintas tipologías de suelos. La referencia para esta correlación son los módulos de deformación obtenidos mediante el ensayo de placa de carga estática.

Este tipo de correlaciones son complicadas puesto que la metodología en la obtención de estos módulos de deformación es diferente, las características de los suelos no son isotropas, las cargas que pueden aplicar los equipos suelen ser diferentes, así como el tiempo de aplicación de las mismas o las propias dimensiones de las placas rígidas de acero.

Por tanto para realizar una correlación fiable, resultaría interesante tener en cuenta las variables que intervienen en el proceso de obtención de la capacidad de soporte de los suelos, de forma que se unifiquen parte de los criterios, ya que cierto tipo de criterios no son modificables por las propias características técnicas de los equipos, intrínsecas a los fabricantes.

El factor más importante, sería cómo validar los datos obtenidos de los módulos de deformación con los equipos dinámicos, estos es, en el ensayo de placa de carga estática, contenido en el PG-3, el módulo de deformación obtenido en el segundo ciclo de carga ya está bastante influenciado por deformaciones plásticas. En un ensayo dinámico, aunque también se pueda producir deformación plástica o permanente esta será mucho menor debido a que la aplicación de la carga solo dura unas decenas de milisegundos como mucho, luego la componente mayoritaria de la deformación en un equipo dinámico será la deformación elástica.

Una aproximación bastante más cercana resulta de comparar los módulos de deformación obtenidos con equipos dinámicos con los módulos elásticos o resilientes calculados en un ensayo triaxial dinámico. Para llevar a cabo el proceso se hace necesario fijar los esfuerzos axiales reales que transmitirían los vehículos al rodar sobre esa sección de la obra de tierra, teniendo en cuenta el esfuerzo de confinamiento al que estarán sometidos los suelos dentro de la misma. Con estos datos de esfuerzos transmitidos a velocidad constante y una vez convenientemente clasificado el tipo suelo se puede preparar una probeta de suelo con las condiciones de compactación requeridas en pliego mediante un ensayo próctor que será sometida a cargas cíclicas axiales manteniendo la presión de confinamiento constante.

Una vez agotada en su mayor parte la deformación permanente, ya avanzado el número de ciclos de carga en el ensayo triaxial dinámico, se obtiene el módulo de deformación resiliente donde la deformación ya es mayoritariamente elástica. Por tanto la magnitud del módulo de deformación resiliente del ensayo triaxial dinámico será próxima a la del módulo de deformación obtenido con equipos de auscultación dinámica.

4. AGRADECIMIENTOS

El autor del artículo agradece la colaboración prestada para la redacción del mismo a Javier Pérez Ayuso y a Julián García Carretero, ambos pertenecientes al Centro de Estudios del Transporte del CEDEX y a Eduardo Santiago Recuerda del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, así como la colaboración prestada por Euroconsult Nuevas Tecnologías S.A.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. UNE 103807-1:2005. Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica Parte 1: Placa rígida, diámetro $2r=600$ mm, Método 1.
- AENOR. UNE 103807-2:2008. Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa dinámica Parte 2: Placa rígida, diámetro $2r=300$ mm, Método 2.
- AFNOR. NF P 94-117-2. 2004. Portance des plates-formes. Partie 2: Module sous chargement dynamique.
- Briaud, J.L., & Jeongbok, S. 2003. Intelligent compaction: Overview and research needs. Texas A&M University. [online]. <http://www.foundationperformance.org/pastpresentations/Briaud-16Mar05.pdf>. [16]
- CEDEX. 1997. Armonización del uso del Deflectómetro de Impacto en Firms. Parte 1. Firms Flexibles. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Manuales y Recomendaciones.
- Fernandez, C. 2006. Ensayo de placa de carga dinámica de 300 mm de diámetro. Madrid. Boletín ALACAM. N° 2. pp. 14-15.
- Hita de, J., y Sánchez, F. 2004. Utilización de la placa de carga dinámica para la recepción de explanadas. 24-27 de mayo 2004. Asociación Española de la Carretera. VI Congreso Nacional de Firms. León.
- LCPC-SETRA. 1994. Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique. Paris.
- LCPC. 2008. Portance des plates-formes. Mesure du module en continu par le portancemètre. Guide technique. Paris.
- Ministerio de Fomento. 2002. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. PG-3.
- Ministerio de Fomento. 2003. Rehabilitación de firms. Instrucción de carreteras. Norma 6.3 IC.
- Ministerio de Fomento. 2003. Secciones de firme. Instrucción de carreteras. Norma 6.1 IC.
- NGT 39. 1997. Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtesgerätes im Eisenbahnbau.
- Quibel, A., Froumentin, M., & Bisson, D. 2003. Contrôle des plates-formes et des routes économiques au moyen d'une nouvelle méthode continue pour évaluer la rigidité. Congrès AIPCR. Durban.
- Santiago, A., García, J.L., y González, P. 2009. Comparación de diferentes métodos de control de compactación del subbalasto. Jornadas hispano-portuguesas sobre geotecnia en las infraestructuras ferroviarias.
- ZTVA-StB 97. 1997. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Aufgrabungen in Verkehrsflächen.
- ZTVE-StB 94. 1994. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau.
- ZTVT-StB 95. 1995. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau.