

**II JORNADA
SOBRE**

MATERIALES MARGINALES EN OBRAS VIARIAS

SEVILLA, 21 DE MARZO DE 2007

“CONTROL DE COMPACTACION Y ENSAYOS IN SITU”

**Luis M Sopena Mañas
Dr. Ingeniero de Caminos
Prof. Mecánica del Suelo y Cimientos
U. Politécnica de Madrid**

ÍNDICE

1. INTRODUCCION

2. CONTROL NORMAL DE LA COMPACTACION

2.1. Generalidades

2.2. Ensayos de referencia

3. EVALUACIÓN DE LA TONGADA COMPACTADA

3.1. Introducción

3.2. Control por densidad

3.3. Control por ensayos de carga con placa

3.4. Ensayo de huella

3.5. Parámetros básicos a controlar

4. OTROS MÉTODOS: CONTROL DE RELLENO FINALIZADO

5. EMPLEO DE LA PLACA DINÁMICA EN EL CONTROL DE OBRAS DE TIERRA

5.1. Introducción

5.2. La placa de carga dinámica

5.3. Utilización de la placa de dinámica en el control de explanadas

6. CONTROL POR PROCEDIMIENTO: BANDAS DE ENSAYO

6.1. Introducción

6.2. Secciones de ensayo para pedraplenes

6.3. Secciones de ensayo en material todo-uno

6.4. Secciones de ensayo para suelos especiales y marginales

7. BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCION

Quizás la mayor innovación de los que se han venido denominando clásicamente como “terraplenes”, y que de ahora en adelante posiblemente deberían designarse bajo una denominación mucho más genérica como “estructuras térreas o asimiladas compactadas” en obras lineales, es el cambio radical en su idea conceptual originaria, en el sentido de reorientarlas hacia su fin último, cual es obtener una plataforma en cota, ejecutable, estable, con deformaciones admisibles y durable, dejando de contemplar los materiales que las constituyen como casi el objeto primordial de la cuestión.

Eso significa que la atención ya no se dirige tanto al análisis de los materiales y su puesta en obra, sino a exigir que el resultado que se obtiene cumpla con el objetivo último perseguido por la obra: que el tránsito sobre la misma se produzca en las condiciones de seguridad y funcionalidad oportunas al servicio de que se trate (automóviles en carretera, trenes convencionales o de alta velocidad, etc.).

Si en el comienzo de la que podríamos denominar como “ingeniería geotécnica vial” casi se restringía la atención a las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados (granulometría, plasticidad, compactabilidad, etc.), poniendo unos altos niveles de exigencia en su calidad, en la actualidad se pretende esencialmente que el “producto” tenga las propiedades geotécnicas suficientes para garantizar que su comportamiento sea satisfactorio, al margen del material utilizado para la construcción de la obra de tierra.

Además de los avances tecnológicos, de limitado alcance, y de los teóricos, tampoco muy profundos, quizás esa idea básica en la concepción de este tipo de obras de tierra ha sido impulsada por las necesidades que las obras plantean. El volumen de tierras que en la actualidad se mueve en las obras de infraestructura ha crecido de modo incommensurable, y tanto desde el punto de vista económico, como del medio ambiental, es ineludible tener que utilizar los materiales disponibles en el entorno próximo, comenzando por los provenientes de las excavaciones propias de la obra.

Si antes se descartaban gran cantidad de suelos por no cumplir unos criterios bastante rigurosos (caso de las arcillas plásticas, por ejemplo), hoy es estrictamente necesario su empleo, pues de lo contrario, y al margen de consideraciones económicas, se multiplicarían los volúmenes de vertedero y de préstamos y canteras, con el gran impacto ambiental que ello supondría.

Y más aún, en esa misma línea, en la actualidad se debe abogar por utilizar también otros materiales, no naturales, producto de desecho industrial (cenizas, estériles mineros, etc.), con objeto de conseguir la sinergia que supone no sólo disminuir la necesidad de préstamos, sino sobre todo buscar un emplazamiento eficaz, útil, no impactante, a esos materiales que de otra forma se destinarían a vertedero.

Hay que decir en todo caso, que éste importantísimo cambio de tendencia no ha sido algo brusco, sino que se ha venido produciendo de modo gradual, y que a su vez ha sido posible por el aumento tanto del conocimiento teórico del comportamiento de los materiales compactados, como por la puesta a punto de nuevos métodos de control, y de avances en la tecnología de la maquinaria de movimiento de tierras y compactación.

Quizás uno de los resultados prácticos de mayor trascendencia fue la nueva redacción del artículo 330 (Terraplenes) para las obras de carreteras del Ministerio de Fomento, y cuya mayor novedad es la gran ampliación estatutaria que se hace de la gama de materiales térreos regulados, hasta la actualidad teóricamente proscritos, así como el enfoque básico desde el que se contemplan estas obras de tierra, ya señalado en los primeros epígrafes.

Como es lógico, la utilización de suelos de comportamiento geotécnico más difícil de acotar y predecir (que podríamos englobar bajo la denominación común de “materiales no convencionales”) ha llevado consigo a adoptar nuevas técnicas para su ensayo y control (ensayos de carga con placa, etc.), así como incorporar otros parámetros geotécnicos en su evaluación. Entre ellos, cabe hacer mención especial a la humedad, y en concreto al grado de saturación, de tan alta relevancia cuando se trata de suelos finos de media y alta plasticidad. Asimismo, la deformabilidad se añade de forma directa a las exigencias de calidad.

En lo que respecta a las técnicas de control propiamente dichas, aparte de incorporar de modo masivo los ensayos de placa de carga, huella, etc., quizás habría que hacer mención especial a la aplicación del que podría denominarse “índice de humedad” o MCV (Moisture Condition Value) como nuevo parámetro para la evaluación y control del estado del suelo en relación con la compactación.

Por último, en esa línea cabría también destacar la inevitable ascensión del denominado “control por procedimiento”, que ha tenido que ganar importancia precisamente porque el empleo de grandes volúmenes de materiales “no convencionales” lleva consigo que no sean prácticos los sistemas clásicos de control de calidad.

También habría que destacar como algo en parte novedoso, sobre todo en lo que a obras de carreteras se refiere, y ligado a las obras de tierra, el empleo cada vez más frecuente de las denominadas “cuñas de transición”, o rellenos localizados, cuya exigencia viene unida a los criterios más limitativos que las mayores velocidades específicas de las infraestructuras lineales llevan consigo.

Para finalizar, cabría hacer referencia a que las nuevas reglamentaciones, o guías, no se limitan ni mucho menos a lo que se refiere a la clasificación y propiedades intrínsecas de los materiales, sino que incorporan de modo global los aspectos básicos de la ejecución, tales como la climatología, espesores de tongada, equipos de maquinaria más adecuados para la compactación, etc.

Precisamente, y retornando a comentar aspectos más prácticos, siendo la succión un parámetro básico del comportamiento de los suelos compactados (no saturados), es el grado de saturación (S_r) en vez de la humedad, la variable de estado más directamente relacionada con aquella, y a la vez más manejable en relación con las variables clásicas, como son las humedades y densidades.

La conclusión de todo ello, ha conducido a establecer el cambio de la humedad del suelo por su grado de saturación como variable a controlar y exigir. Modificando la antigua tendencia que prácticamente hacía referencia exclusiva a la densidad a obtener (con referencia a la máxima del Proctor), y como mucho a la humedad.

Así pues, la metodología clásica del control de la compactación en las obras de tierra, fundamentalmente ligada a la determinación de la densidad y humedad in situ de la tongada compactada, aún siendo útil y punto de referencia todavía obligado como contraste, se viene aceleradamente mostrando como un instrumento cada vez menos válido, por diversos motivos.

Uno de ellos es la necesidad de tomar decisiones en obra que no pueden dilatarse en el tiempo, cada vez más inmediatas, sin esperar a tener parámetros de contraste como los clásicos de referencia de los ensayos de apisonado (Proctor: humedad óptima, densidad máxima) pues la posibilidad de mover cada vez mayores volúmenes de tierras conlleva al trabajo continuo, impidiendo parar los tajos para la toma de decisiones.

Pero también, como se ha dicho, desde el punto de vista geotecnológico es aún más trascendente, debe tenerse en cuenta que cada vez se tiende a emplear una gama más amplia y diversa de materiales para los rellenos, con suelos cuyo comportamiento no se conoce tanto, y cuya trabajabilidad en obra tampoco es sabida por completo.

Por todo ello, en los apartados que siguen se han recogido tanto los ensayos clásicos de control de producto terminado por medio de la densidad, como los más actuales y representativos (la normativa española apunta en esta dirección) referentes a los ensayos de carga con placa (incluyendo aquellos, como los dinámicos, que permiten alcanzar altos rendimientos).

Por otra parte, se incluye también un capítulo dedicado a las denominadas "bandas de ensayo", que como ensayos a escala in situ constituyen un sistema tanto de establecer un procedimiento de ejecución del relleno compactado, según ha sido más habitual cuando se ha tratado de pedraplenes y todo-uno, como en la actualidad suponen una tendencia creciente como medio para estudiar la utilización de una más amplia gama de materiales, en general de peores calidades geotécnico-viales, y sobre los que se dispone de menor experiencia (suelos marginales).

2. CONTROL NORMAL DE LA COMPACTACION

2.1. Generalidades

El Control de la compactación tiene habitualmente por objeto comprobar que, por un lado, cada tongada cumple las condiciones mínimas de densidad seca y humedad establecidas. Por otro lado, tiene también como objeto el comprobar que las características de deformabilidad sean las adecuadas para asegurar un comportamiento aceptable del relleno en fase de realización.

A este efecto, el control se puede efectuar por el método de "Control de Producto Terminado", a través de determinaciones "in situ" en el relleno compactado, comparándose los resultados obtenidos con los correspondientes valores de referencia (resultados de los ensayos de laboratorio, como los de identificación y compactación, o valores establecidos en este Pliego, como módulos de deformación, etc). En circunstancias especiales es posible prescribir, además, la realización de ensayos complementarios para caracterizar las propiedades geotécnicas del relleno (resistencia al corte, expansividad, colapso, etc).

Con este método de "Control de Producto Terminado" últimamente se suele considerar que la compactación de una tongada es aceptable siempre que se cumplan dos condiciones:

- La densidad seca "in situ" será, como mínimo, la establecida.
- El módulo de deformación, E_{v2} , en el segundo ciclo de carga, en el ensayo de carga con placa, será igual o superior a un determinado valor, de los que a continuación se indican algunos típicos:

a) Cimentación, Núcleo y Espaldones

Suelos tolerables y adecuados:	20-30 MPa
Suelos seleccionados :	40-50 MPa

b) Coronación

Suelos adecuados:	40-50 MPa
Suelos seleccionados:	60-70 MPa

Por otra parte, también en este ensayo de carga sobre placa, la relación, K , entre el módulo de deformación obtenido en el segundo ciclo de carga, E_{v2} , y el módulo de deformación obtenido en el primer ciclo de carga, E_{v1} , debe cumplir una condición: en general, se establece que no será superior a 2,3-2,5 ($K \leq 2,3$).

Cuando lo aconsejen las características del material o de la obra las determinaciones "in situ" de densidad, humedad y módulo de deformación se completarán o se sustituirán por otras "in situ", como los ensayos de huella o, incluso, recurriendo al

método de "Control de Procedimiento" a partir de bandas de ensayo previas. En estas últimas deben quedar definidas, para permitir su control posterior, las operaciones de ejecución, equipos de extendido y compactación, espesores de tongada, humedad del material y número de pasadas, debiendo compararse en esas bandas de ensayo que se cumplen las condiciones de densidad seca y módulo de deformación y relación de módulos que se acaban de establecer.

2.2. Ensayos de referencia

a) Ensayo de Compactación Proctor

El Pliego de Prescripciones Técnicas debe definir el tipo de ensayo Proctor (Normal NLT 107/91 o Modificado, NLT 108/91) a considerar como de referencia. En este sistema de control, se clasifican los materiales a utilizar en grupos cuyas características sean similares; a estos efectos se consideran similares aquellos materiales en los que se cumpla, en un mínimo de tres muestras ensayadas, lo siguiente:

- Pertenencia al mismo tipo de clasificación definida.
- Rango de variación de la densidad seca máxima en los ensayos Proctor no superiores al 3%.
- Rango de variación de la humedad óptima en los ensayos Proctor no superiores al 2%.

Dentro de cada grupo se establecen los correspondientes valores medios de la densidad máxima y de la humedad óptima que servirán de referencia para efectuar el análisis de los resultados del control. El volumen de cada uno de esos grupos será suficientemente elevado (mayor que 20.000 m^3); en caso contrario se recurrirá a otro procedimiento de control.

En el caso de que los materiales procedentes de una misma zona de extracción no puedan agruparse de la forma anteriormente descrita ni sea posible separarlos para su aprovechamiento, puede no ser aplicable el método de control de Producto Terminado mediante ensayos Proctor, debiéndose recurrir al ensayo de carga con placa, (con alguno complementario como el de huella) o al método de Control de Procedimiento.

b) Ensayo de carga con placa

Para determinar el módulo de deformación del relleno se utilizará el ensayo de carga con placa (fig. 1). Las dimensiones de dicha placa se fijarán de acuerdo con la granulometría del material, de forma que su relación con el tamaño máximo del terreno sea, al menos, de 5. En ningún caso la superficie de la placa será inferior a 700 cm^2 . El ensayo se realizará según la norma NLT 357/86 (actualmente UNE 103808) aplicando la presión, por escalones, en dos ciclos consecutivos de carga.

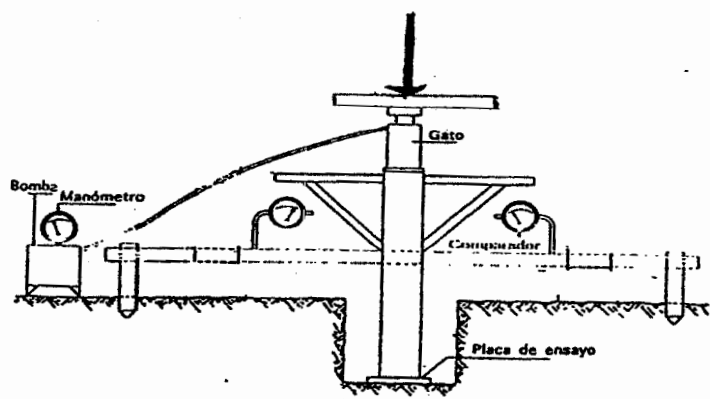


Figura.1.

BASTIDOR PARA COLOCAR LA MIRA DE INVAR EN EL ENSAYO DE HUELLA

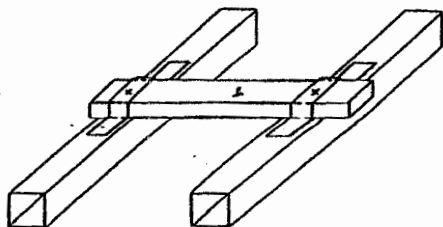


Figura.2.

c) Ensayos de la huella

En el caso de realizar (fig. 2) el ensayo de la huella (con camión de 10 t, el control de asientos sobre diez puntos separados 1 m, antes y después del paso del camión, etc), se suele utilizar la Norma SNV, 640-586.

Como valores máximos de referencia para la huella admisible se suelen utilizar los siguientes:

- a) Cimentación, núcleo y espaldones: 5 mm
- b) Coronación: 3 mm

3. EVALUACIÓN DE LA TONGADA COMPACTADA

3.1. Introducción

Para seguir el sistema de control por producto terminado pueden escogerse diversas características del material compactado. La más corriente es la densidad seca conseguida y su relación con una densidad patrón obtenida en laboratorio. Sin embargo, cuando el material contiene una proporción elevada de gruesos, este procedimiento puede no ser aplicable. En este caso suelen ser de utilidad los ensayos de carga, aplicables a cualquier tipo de suelo siempre que el tamaño de los gruesos se mueva dentro de ciertos límites. Los ensayos de carga se pueden hacer con placa o bien mediante un camión cargado de características determinadas.

En la superficie de la explanada (coronación) aunque puedan hacerse ensayos normales de densidad in situ, hay muchas normativas en las que se exige la determinación de sus características de deformación efectuando algún tipo de ensayo de deformabilidad.

3.2. Control por densidad

Este sistema es el más corriente, y consiste en determinar la densidad in situ seca por alguno de los métodos hoy día disponibles y compararla con una densidad máxima patrón obtenida en el laboratorio. El control por densidades precisa, por un lado, determinar la densidad seca del terreno compactado y, por otro, la densidad patrón con la que ha de compararse. La dificultad reside en poder obtener los resultados con la rapidez precisa para poder aprobar o rechazar una tongada antes de extender la siguiente.

Para la determinación de la densidad in situ existen diversos procedimientos. Hay un primer grupo, que pudiera llamarse de sustitución, en el que se encuentra el de la arena (NLT-109/72), el del aceite (NLT-110/72), el del balón de agua y el Washington Dens-O-Meter. También a veces se usa, especialmente en desmontes, la hincia de un cilindro metálico de pared delgada o se determina la densidad a partir de una muestra en bloque. Por último hay que citar los métodos nucleares.

El primer grupo de procedimientos de sustitución es el más frecuentemente usado y conduce a resultados normalmente satisfactorios si se realizan siguiendo cuidadosamente las correspondientes normas. El problema que presentan es que su ejecución lleva bastante tiempo, que, como se ha indicado anteriormente, es la cualidad básica para este tipo de control.

La determinación de la humedad puede hacerse mediante secado en estufa (NLT-10/72), pero ello llevaría muchas horas. Por eso, se han desarrollado otros métodos rápidos, como son el secado en plancha caliente, el método del alcohol y el secado con infrarrojos. También se han desarrollado otros métodos de determinación rápida de la humedad, como son el del picnómetro de aire y el de la reacción con carburo de calcio, de utilidad variable según los tipos de suelos. En general, todos suelen ser adecuados para suelos granulares pero pueden presentar dificultades cuanto mayor es su plasticidad.

Los aparatos nucleares son muy utilizados desde hace ya muchos años para medir tanto la densidad como la humedad in situ (Gardner et al., 1971). El inconveniente de los aparatos nucleares es su elevado coste y que precisan reparaciones y atenciones de personal especializado. Por otra parte, hay que tener en cuenta que, si bien es posible hacer con ellos un gran número de determinaciones en poco tiempo, sigue subsistiendo el problema de que hay que compararlas con una densidad patrón, cuya determinación continúa siendo igual de laboriosa. A pesar de todo, su empleo se ha extendido mucho, pues sus ventajas son muy significativas.

El aparato MCV desarrollado por el TRRL (Parsons, 1978, 1979 y 1981) fue originalmente pensado para determinar la humedad del suelo sin tener que secarlo, aunque posteriormente se han encontrado aplicaciones más interesantes para el mismo. En la actualidad, se están desarrollando interesantes aplicaciones, que implican al propio sistema de control de calidad de la compactación.

Una de las cuestiones que hay que decidir es con qué frecuencia deben realizarse los ensayos de control y en qué forma han de compararse los resultados obtenidos con los valores prescritos. El número de ensayos a realizar depende de la heterogeneidad del suelo, de la uniformidad de la ejecución de los diferentes tramos, etc. Como idea aproximada, las recomendaciones francesas (SETRA y LCPC, 1976) dan como valor medio, si los materiales son homogéneos, la cifra de un ensayo de densidad por cada 500 m³ de terraplén compactado y un ensayo Proctor cada 5.000 m³.

Como resumen de la práctica en USA, en HRB (1971) se citan como valores típicos para las densidades in situ las cifras, mínimas en este caso, de un ensayo por cada 1.500 m³, o un ensayo por tongada y por cada 300 m lineales de terraplén. También se requiere a veces un número mínimo de ensayos por día. En Suiza (VSS 1972, SNV 640585a) se utiliza el siguiente procedimiento: el número de ensayos para un material determinado deberá ser por lo menos cinco; uno de ellos podrá ser inferior al mínimo exigido, pero la diferencia no deberá ser superior al 5% de la densidad seca. Si el número de ensayos es inferior a cinco, todos los valores deberán ser superiores al exigido.

Las directrices españolas para el control de la calidad de la compactación de terraplenes, dicen lo siguiente:

Dentro del tajo a controlar se define:

LOTE:

Material que entra en 5.000 m² de tongada, o fracción diaria compactada si ésta es menor, exceptuando las franjas de borde de 2,00 m de ancho.

Si la fracción diaria es superior a 5.000 m² y menor del doble se formarán dos LOTES aproximadamente iguales.

MUESTRA:

Conjunto de 5 unidades, tomadas en forma aleatoria de la superficie definida como LOTE. En cada una de estas unidades se realizarán ensayos de:

- Humedad
- Densidad

FRANJAS DE BORDE:

En cada una de las bandas laterales de 2,00 m de ancho, adyacentes al LOTE anteriormente definido, se fijará un punto cada 100 m lineales. El conjunto de estos puntos se considerará una MUESTRA independiente de la anterior, y en cada uno de los mismos se realizarán ensayos de:

- Humedad
- Densidad

Como criterio de aceptación, se establece que las densidades secas obtenidas en la capa compactada deberán ser iguales o mayores que las especificadas en cada uno de los puntos ensayados. No obstante, dentro de una MUESTRA, se admiten resultados individuales de hasta un dos por ciento (2%) menores, que los exigidos en Proyecto, siempre que la media aritmética del conjunto de la MUESTRA resulte igual o mayor que el valor fijado.

3.3. Control por ensayos de carga con placa

Desde hace muchos años se han utilizado los ensayos de placa de carga para determinar las características de resistencia y deformabilidad del terreno para cimentaciones. También en carreteras se ha empleado este sistema, pero con menos frecuencia. Una de sus aplicaciones ha sido obtener el módulo de reacción del terreno de la explanada para el dimensionamiento de firmes de hormigón. También se emplean en algunos países, como en la actualidad en España, para definir las características que ha de cumplir la coronación de terraplenes y pedraplenes, y en algunos casos los materiales del núcleo.

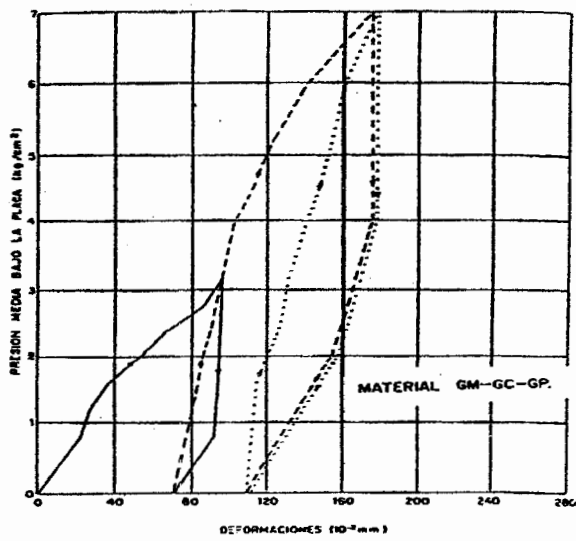
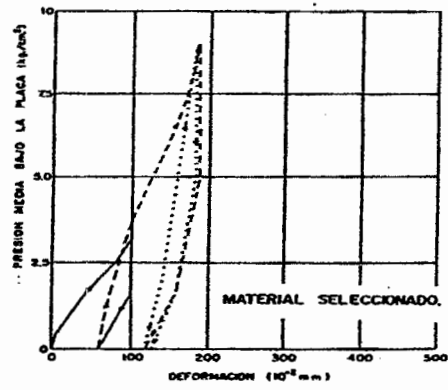
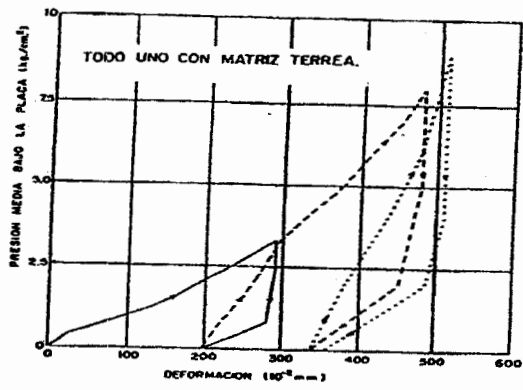


Figura.3.

Los ensayos de placa (fig.3.) tienen la ventaja de que, si sus dimensiones son relativamente grandes, pueden ejecutarse con materiales que contengan gruesos. Tienen en cambio el inconveniente de ser bastante costosos, sobre todo si se utilizan placas grandes, y de estar muy influenciados por las condiciones de humedad del terreno, que, por otra parte, pueden no ser fáciles de controlar. Quizás los dos países que más han utilizado esta técnica y desde hace más tiempo sean Suiza y Alemania. Pero el ensayo tipo alemán tiene el inconveniente de ser excesivamente lento en su ejecución. Por ello, en los últimos años se han desarrollado, tanto en Suiza como en Francia, ensayos de placa que se basan en la filosofía alemana del doble ciclo, pero que se ejecutan de manera mucho más rápida; pues hay que tener en cuenta, que lo que se trata de obtener en el caso de carreteras es un índice del estado en que se encuentra el terreno y no necesariamente un parámetro real de deformación, como ocurre para el cálculo de cimentaciones.

La característica más destacada del ensayo alemán consiste en que se efectúan dos ciclos de carga y descarga, y se utilizan ambos para calificar las condiciones del relleno. Además, las placas utilizadas son de diámetros grandes: 300 mm ó 600 mm, para poder ensayar materiales con partículas de hasta 200 mm con esta última.

El módulo de deformación se determina mediante la expresión:

$$E_v = 0,75 \frac{P}{s} \times D$$

La principal dificultad de los ensayos de carga en suelos cohesivos es el contenido de agua, que puede influir mucho en los resultados. Parece evidente que, para que los resultados sean representativos, la humedad deberá estar próxima a la de equilibrio del terreno después de construir el firme (dicha humedad es del mismo orden de magnitud que la óptima Proctor Normal) para suelos plásticos. Lo que hay que evitar en todo caso es efectuar el ensayo sobre una costra endurecida por desecación o reblandecida por el agua. Para ello puede ser preciso eliminar la capa superficial del material, pero sin alterar el estado del terreno subyacente.

Por otra parte, como se indicó anteriormente, los ensayos de carga en Suiza se efectuaban hasta hace unos años con un solo ciclo de carga y descarga. Actualmente se hacen dos ciclos, como en el ensayo alemán, pero con placa relativamente pequeña de 700 cm² (298,5 mm de diámetro), que admite un tamaño máximo de grano de 100 mm.

3.4. Ensayo de huella

Las normas suizas de métodos de control (VSS, 1972, SNV 640586) y especificaciones (VSS, 1972, SNV 640585a) imponen como procedimiento para juzgar la compacidad del terreno la ejecución de ensayos de densidad in situ y su correlación con la

densidad máxima Proctor Normar. Sin embargo, cuando el tanto por ciento en peso de material superior a 7 mm es mayor del 60%, estiman que el ensayo de compactación con el molde Proctor Normal (en Suiza se utiliza el AASHO de 948 cm³) no es representativo y recomiendan recurrir al ensayo de la huella (VSS, 1973, SNV 670365). Las características de la superficie de la explanación las determinan, bien con el ensayo CBR in situ o mediante ensayos de placa de carga.

El ensayo de la huella consiste en esencia en medir el asiento que origina el paso de un eje de 10 t con ruedas gemelas, para lo cual se utiliza un camión.

El número de puntos de medida debe ser de por lo menos 10. Para poder efectuar la operación con rapidez y precisión, se colocan a intervalos de 1 m en la alineación de dos jalones; su posición queda fijada dejando extendida una cinta métrica al lado. Antes de hacer pasar el camión, se coloca sobre cada punto escogido un soporte en H con las dos ramas separadas entre sí a la misma distancia de los ejes de las ruedas gemelas y se procede a su nivelación. Se repite la operación en los mismos puntos después de hacer pasar el camión por la alineación establecida a la velocidad de un hombre al paso.

Se considera que la compactación es suficiente cuando la media aritmética de los asientos de los 10 puntos de medida, δ_m , es inferior a 3 mm para la capa de coronación de 0,60 m, y de 5 mm para el núcleo del relleno.

Este procedimiento puede utilizarse de forma análoga para el control de compactación de tramos de ensayo, bien sea con el camión o directamente con la maquinaria empleada, viendo lo que desciende la tongada después de pasadas sucesivas. Normalmente, para estos casos se utilizan clavos como referencias en lugar de los mencionados dispositivos en H. Es también muy útil para detectar en obra donde es conveniente efectuar ensayos de placa adicionales, que son más lentos y costosos.

Para la interpretación de estos ensayos debe de tenerse en cuenta el contenido de agua del suelo en el momento de su ejecución. Para que se puedan considerar representativos, la humedad deberá ser aproximadamente igual o superior a la de equilibrio, o sea del orden de la óptima Proctor o hasta un 2% por encima (por ello, las normas suizas requieren efectuarlos nada más terminada la compactación).

3.5. Parámetros básicos a controlar

Con un significado intrínseco, en lo que se refiere a la estructura de los suelos finos compactados se ha puesto de manifiesto de modo muy explícito la cuestión relativa a la humedad, y en concreto al grado de saturación, que es el verdadero parámetro que mide el estado y proporción del agua en el suelo. En ese sentido, como se dijo, como verdaderos parámetros de estado del material compactado (Control de Producto Terminado), se adopta el clásico de la densidad seca, añadiendo el estado de humedad, pero a través del grado de saturación (figura.4).

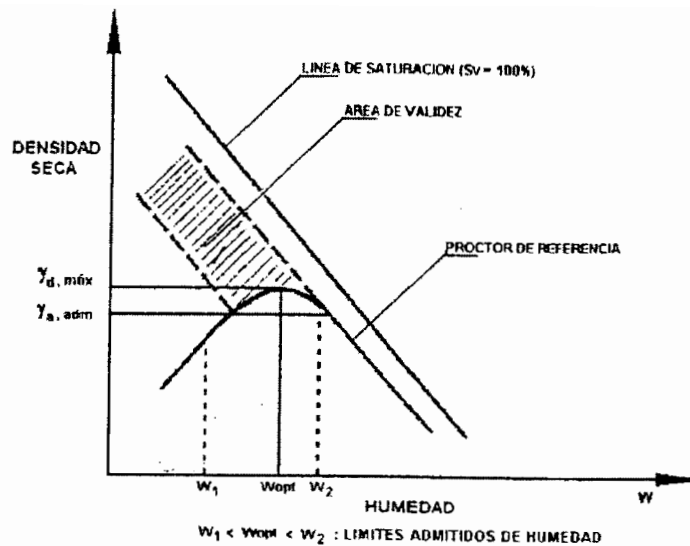


Figura.4. Criterio de aceptación, según el binomio densidad-grado de saturación

Por ello, los criterios de aceptación y rechazo se basan en la actualidad, desde el punto de vista de los parámetros de estado del suelo, en contemplar a la vez la densidad y la humedad: se establece una densidad seca mínima, y un rango de humedades respecto a las óptimas del ensayo Proctor (del lado seco y húmedo), determinándose la zona de aceptación cuando el punto que representa ese binomio (Densidad, Humedad) queda en el interior de la banda señalada en la figura (limitada por las líneas de trazos paralelas a la línea de saturación).

También en ese sentido, cabe hacer referencia a que se propugna el ensayo Proctor Modificado como Proctor de Referencia; dejando el Proctor Normal para el caso de los suelos finos arcillosos (incluyendo, claro, a los marginales). Adoptando, así, la clara expresión de que la maquinaria empleada usualmente en las obras transmite intensidades y tipos de esfuerzos de compactación más acordes con la metodología y la energía específica utilizadas en el ensayo Modificado.

El otro parámetro que se habilita utiliza en general como exigencia es la Deformabilidad, evaluada a través de ensayos de carga con placa, estableciéndose valores mínimos para el módulo de deformación del 2º ciclo de carga en el ensayo $E_v = 250-500 \text{ kp/cm}^2$, así como un valor máximo para a relación entre los módulos de este 2º ciclo y del 1º ($K = E_{v2}/E_{v1} = 2-3$).

Con respecto al valor de la relación de módulos (K) cabe señalar que las restricciones actuales son muy difícilmente trasladables a la práctica en el caso de los suelos finos, y sobre todo en los marginales. Cuestión que debe merecer una atención en el futuro, y quizás una modificación al respecto.

Haciendo hincapié respecto a los parámetros básicos de estado, cabe señalar que se impone con carácter general una condición para la densidad seca mínima a exigir, que es del 100% de la del ensayo Proctor de Referencia para capas de Coronación, y del 95% de dicha densidad para el resto de zonas del terraplén.

Por otra parte, además se exige que el grado de saturación sea equivalente al que corresponde a humedades comprendidas entre +1 y -2 de la humedad óptima del Proctor de Referencia; límites que se establecen entre +3 y -1 para los suelos expansivos o colapsables.

El criterio de aceptación, por lo tanto, queda referido a un área del diagrama intrínseco humedad-densidad seca que corresponda al suelo utilizado, siendo válidos los estados que queden comprendidos entre ambas isolíneas de grado de saturación, y por encima de la densidad seca mínima establecida. Se insiste en que el grado de saturación, como proporción de huecos con agua y huecos con aire, es el que mide la respuesta del suelo en relación al contenido de agua, al margen de la densidad seca a la que corresponda.

En todo caso, es importante recordar que deben acometerse estudios específicos en cada caso, que justificarán oportunamente la utilización del material, su localización dentro del terraplén, y las condiciones y exigencias de puesta en obra.

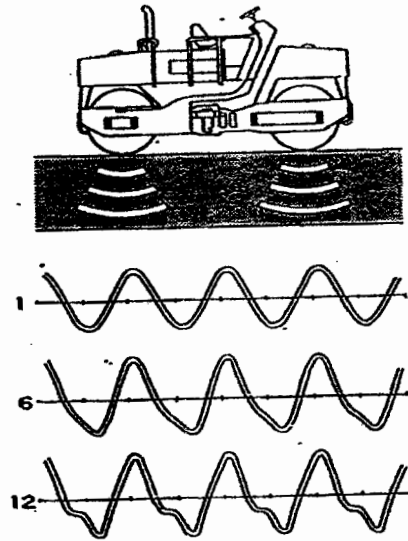
Además, y como aspecto muy trascendente, la normativa habilita la posibilidad de “salirse” del marco normativo concreto, brindando la alternativa de que se debidamente justificado y documentado, se pueden variar las condiciones y exigencias en ella impuestas, así como emplear “cualquier material”, siempre que el producto obtenido cumpla fehacientemente las condiciones básicas del “relleno compactado”: Ejecutabilidad, Estabilidad, Deformabilidad, y Durabilidad.

Así pues, no se trata tanto de “encorsetar” la concepción y ejecución de esta unidad de obra de tierras, sino de establecer un mínimo marco técnico de referencia, que contemple quizás los casos más comunes, dentro de las especificidades que ya estos materiales llevan de forma intrínseca en su comportamiento, y que sirva de guía para abordar los estudios particulares en los que justificar el empleo de la gama más amplia posible de materiales.

4. OTROS MÉTODOS: CONTROL DE RELLENO FINALIZADO

A) El compactómetro

El "compactómetro" es un instrumento que se utiliza en compactadores vibratorios y que permite al operador conocer en cada momento el estado de compactación del terreno, de forma que puede racionalizar su trabajo para obtener un aprovechamiento óptimo del tiempo y del equipo. Tiene la ventaja, frente a otros métodos convencionales de control, de evitar los tiempos de parada para permitir la realización de ensayos, obteniendo, al mismo tiempo, una información menos local y dispersa que éstos.



- Compactómetro. Localización del dispositivo de medida. Variación de la señal con el número de pasadas.

Figura.5.

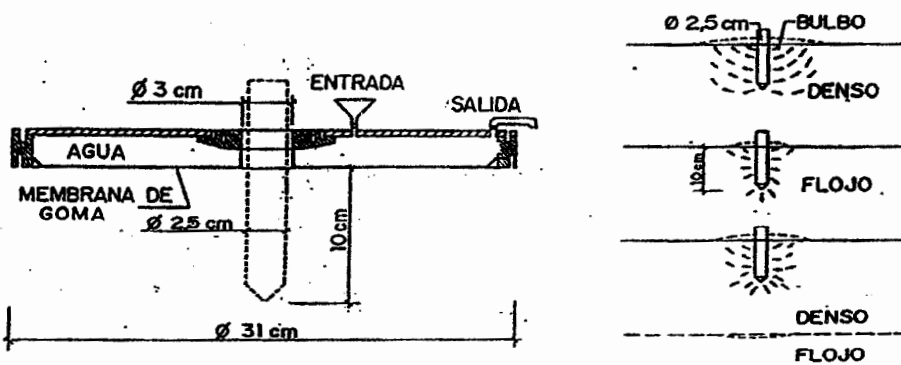


Fig. 6.- Dispositivo para el control de densidades de Eggstad.

Principio del método de control de densidades de Eggstad.

Figura.6.

El principio de su funcionamiento se basa en la medición y análisis de la interacción dinámica entre el rodillo y el terreno (en la fig. 5 se muestra cómo se acopla el sistema de medida a un compactador vibratorio). El dispositivo consta de un acelerómetro colocado en el soporte del rodillo y del compactómetro propiamente dicho, que va situado en el salpicadero del vehículo.

Un sensor registra continuamente la aceleración del rodillo, mandando una señal que pasa por un filtro con dos canales que corresponden a la frecuencia fundamental y al primer armónico de las vibraciones del rodillo. El valor a medir, que puede hacerse reflejar sobre una pantalla, representa el cociente entre la amplitud de la aceleración del primer armónico y la amplitud de la frecuencia fundamental, generalmente en valores medios para intervalos de cinco o treinta segundos. Cuando se supera un determinada magnitud, un dispositivo óptico preparado al efecto puede avisar al operario de que la compactación ha alcanzado la calidad deseada. También se detecta fácilmente cuando se comienza a producir el fenómeno de sobrecompactación.

Si se compacta un determinado perfil con un rodillo vibratorio, se puede observar que la señal del acelerómetro cambia su forma al incrementar el número de pasadas. Durante la primera pasada la señal es casi sinusoidal; progresivamente se va produciendo una cierta distorsión que aumenta con el número de pasadas. La razón física principal para que se produzca la distorsión de la señal del transductor está en la reducción de la zona de contacto entre el rodillo vibratorio y el suelo durante una parte del ciclo de la excéntrica. El contacto es tanto más reducido cuanto más rígido es el suelo.

Para interpretar debidamente los resultados obtenidos con este aparato hay que tener en cuenta diversos factores que pueden influir en los mismos:

- La velocidad.
- Los valores del "compactómetro" deben compararse trabajando el equipo en el mismo sentido de avance (hacia adelante o hacia atrás).
- El "compactómetro" obtiene valores medios para periodos de 5 ó 30 segundos.
- Las variaciones grandes de los valores obtenidos con el compactómetro se deben fundamentalmente a variaciones en las propiedades del suelo.
- La zona de influencia del rodillo alcanza profundidades que pueden superar los 150 cm.
- Antes de empezar a operar con el "compactómetro" hay que tararlo.

Se han determinado relaciones lineales entre los valores registrados por el "compactómetro" y los obtenidos mediante ensayos de densidad "in situ", con los módulos de deformación estáticos obtenidos a partir de ensayos de placa de carga, con los módulos de deformación dinámicos obtenidos con el deflectómetro de impacto y con las huellas dejadas al pasar vehículos de características determinadas.

B) El comprímometro

Este aparato (Eggestad, 1974 y 1980) sirve para determinar el grado de compactación de arenas e incluso de gravas graduadas de hasta unos 20 mm (Neville, 1979). El principio del método se basa en la medición del volumen del bulbo superficial que se origina al hincar un pistón en un terreno granular (fig. 6).

El ensayo consiste en esencia en introducir un pistón de 2,5 cm de diámetro en el terreno, a través del orificio central, y medir el volumen del bulbo que se produce como consecuencia de la hinca. Cuanto mayor sea la densidad del material, tanto más grande será el volumen del bulbo. Dicho volumen se mide dejando el aparato inicialmente lleno de agua y midiendo el agua expulsada por el orificio de salida durante la hinca. Es por tanto un ensayo que puede realizarse en unos 5 minutos.

El volumen medido se expresa en relación con el volumen del pistón introducido a través de su cociente R. Se ha comprobado que existe una clara correlación entre el valor de R y bien sea la densidad relativa o el tanto por ciento de densidad referida al Proctor Normal (o en su caso al Modificado). Esta correlación resultó ser casi independiente, tanto de la granulometría como del contenido de agua de los materiales que se ensayaron, siempre que la arena se encuentre en estado húmedo (ni seca ni saturada, pero que tenga una cierta tensión capilar).

Como orientación para ayudar a escoger los índices adecuados, se puede recurrir a las curvas de calibrado o a los valores del índice de compactación siguientes (que en la última publicación citada corresponden a una penetración de 10 cm).

Compactación	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Índice de compactación	< 35	35-70	50-70	70-90	> 90

C) Control a posteriori

Aunque no es recomendable controlar solamente cuando se ha finalizado el relleno, sin embargo, hay ocasiones en las que este tipo de control resulta necesario (bien como comprobación final de la obra o por no haberse seguido los procedimientos habituales de seguimiento según progresa la construcción).

En ocasiones se recurre a excavar pozos y efectuar los ensayos convencionales a distintas profundidades según avanza la excavación. Este procedimiento, además de costoso, tiene el inconveniente de que hay que rellenar después el pozo, dejándolo en condiciones similares a las del resto del relleno, lo que resulta muy difícil de conseguir.

Por ello, en algunos casos se ha recurrido a ejecutar ensayos in situ del tipo empleado en el estudio de cimentaciones. Hansbo y Pramborg (1980) han efectuado un estudio comparativo en rellenos de arenas y arenas limosas y con grava, utilizando ensayos de penetración normales tipo estático y dinámico y ensayos presiométricos tipo Menard. Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, según deducen de la comparación con ensayos de densidad y placas de carga. Con suelos cohesivos, sin embargo, la interpretación de los resultados puede presentar más dificultades.

D) Ondas Superficiales

Dentro de ese grupo de técnicas especiales, cabe hacer referencia específica al denominado “análisis espectral de ondas superficiales” (Cuéllar, V., Valerio, J. y Muñoz, F. 1993; Cuéllar, V. y Valerio, J. 1997 y Valerio, J. 1990).

Mediante esa técnica (el dispositivo de ensayo puede verse en la figura 7), es posible determinar el perfil de velocidades de propagación de las ondas Rayleigh, permitiendo tener con la profundidad en el terreno ese parámetro básico (figura 8) que a su vez se pone en correspondencia con el “estado geomecánico” del material ensayado (en este caso, el relleno o terraplén). Siendo posible encontrar correlaciones con los parámetros clásicos, como el grado de compactación, la deformabilidad, índice CBR, etc.

El procedimiento general, en el que se obtiene la curva de dispersión-profundidad, y a continuación la relación profundidad-velocidad tangencial (V_s), se ha venido aplicando para evaluar el estado global de una masa de terreno (y comparar la posible evolución de distintas fases, lo que ha permitido su aplicación, por ejemplo, al siempre difícil caso de los tratamientos de mejora en masa de terrenos) y sus resultados han sido muy satisfactorios.

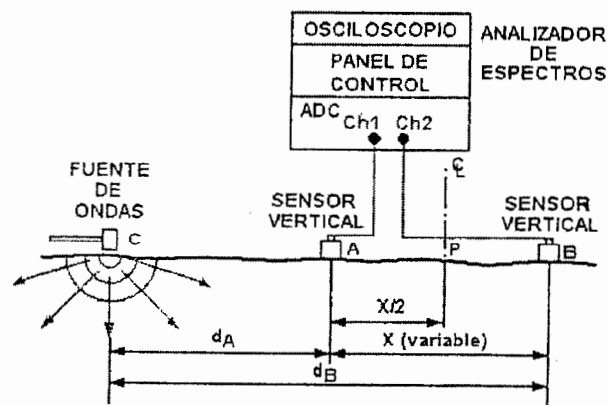


Figura. 7. Disposición de los equipos en el método del análisis espectral de las ondas superficiales (Cuéllar, 1994)

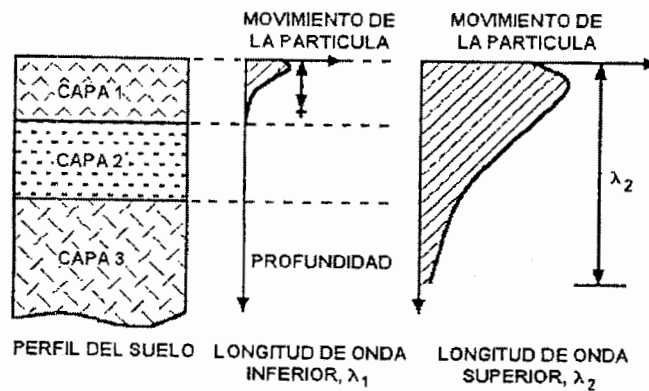


Figura. 8. Relación entre longitud de onda y espesor de la capa (Valerio, 1997)

E) Aplicaciones especiales

Al margen de los sistemas que podríamos denominar clásicos, se considera de alto interés citar un ensayo, para el que se propone que se adopte definitivamente el de "Índice de Humedad" (Jiménez Salas, 1991), que nacido en Inglaterra con otra finalidad (compactabilidad de las cretas) y desarrollado por Parson en el TRL, se ha venido aplicando con otras finalidades (Soriano, A. 1989), que se estima que tienen un aprovechamiento muy interesante, precisamente sobre todo en lo que se refiere a la ejecución de rellenos compactados con materiales arcillosos, cuya frecuencia aumenta sin solución de continuidad.

El aparato que se utiliza es sencillo y transportable manualmente (fig. 9), consistiendo el ensayo en apisonar un volumen de suelo con una determinada energía, según un procedimiento normalizado, midiendo los descensos que se producen por la disminución de volumen de la muestra ensayada.

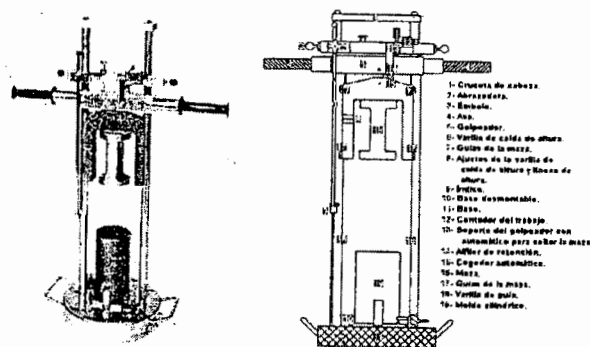


Figura. 9. Aparato para la determinación del índice M.C.V. (Parson, 1976)

Como es sabido, según avanza el proceso de compactación, el efecto sobre la masa de suelo disminuye, y los asientos producidos por el impacto de la maza decrecen.

En esencia, lo que se determina mediante este ensayo es el momento en que se alcanza en el proceso de compactación, para una determinada humedad, un estado muy próximo al de “oclusión del aire en los poros”, más allá del cual la compactación apenas avanza. Realmente, así se determina en obra de un modo simple y directo la densidad húmeda máxima que es posible alcanzar con esa cantidad, y “tipo”, de energía específica transmitida.

5. EMPLEO DE LA PLACA DINÁMICA EN EL CONTROL DE OBRAS DE TIERRA

5.1. 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.

Así, la vigente Instrucción de Carreteras Norma 6.1 IC “Secciones de Firme” establece las tres categorías de explanada (E1, E2 y E3) en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (de acuerdo con la Norma UNE 103808).

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 UNE 103808, o bien, como indica la propia Norma 6.1 IC, un valor de la deflexión patrón máxima, que es función de la categoría de explanada requerida.

En los términos indicados en la Normativa aplicable, 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 metodologías alternativas 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.

5.2. La placa de carga dinámica

La Placa de Carga Dinámica que más se viene utilizando corresponde con la Dynaplaque 2 desarrollada por el LCPC. Se trata de un generador de impactos que aplica en el terreno a auscultar 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 un peso que cae sobre un resorte amortiguador situado sobre una placa de carga de diámetro 600 mm.

La placa de carga dinámica (UNE 103807-1) realiza, en cada uno de los puntos de ensayo, 3 impactos, registrándose la curva esfuerzo-deformación y obteniéndose como resultado los valores del Módulo Dinámico. El rango de medida de dicho módulo dinámico es de 20 a 250 MPa, pero al disponer también del dato de deflexión en cada punto, se pueden evaluar valores fuera de este rango. La deflexión del terreno y la fuerza del impacto se miden por unos sensores instalados en la placa.

El valor del “Módulo bajo carga dinámica” E_{vd} se calcula a partir de las medidas directas de las magnitudes físicas durante el proceso de carga dinámica:

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

En esta relación, la rigidez del suelo k se determina suponiendo que el comportamiento de la placa de carga y del suelo bajo esta placa es asimilable al de un sistema tipo masa/muelle/amortiguador, representado por la figura.

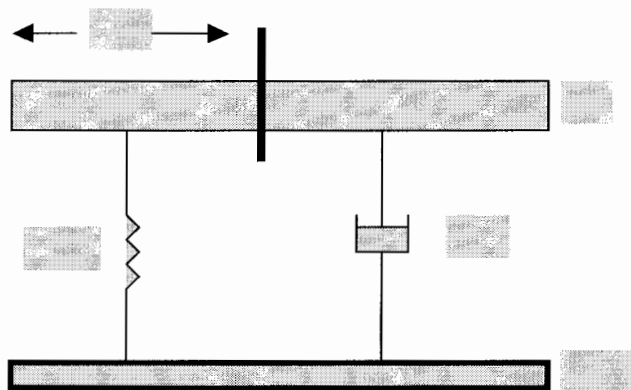


Figura.10. Modelización del equipo de Placa de Carga Dinámica

Donde:

- Evd* Módulo bajo carga dinámica expresado en megapascales
- ν* Coeficiente de Poisson del suelo que forma la explanada (adimensional)
- R* Radio de la placa de carga, expresado en milímetros
- K* Rigidez del suelo que forma la explanada, expresado en meganewtons por metro



Placa de Carga Dinámica

El vehículo suele ir 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.

5.3. Utilización de la placa de dinámica en el control de explanadas

En los últimos años, se ha venido utilizando la placa dinámica en la recepción de las explanadas realizadas en algunas de las obras de infraestructuras de gran importancia en nuestro país. Esto ha permitido disponer de muchos datos de correlaciones entre los valores obtenidos con las placas tradicionales y la placa dinámica. En cualquier caso, 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 portante y realizar sobre ellas los pertinentes estudios de detalle que profundicen en las diversas causas que originan los comportamientos no conformes de la misma.

El ensayo se realiza en tres ciclos de aplicación de la carga, obteniéndose los módulos dinámicos en cada uno de ellos. El valor obtenido en el tercer ciclo de aplicación de la carga se considera como el módulo dinámico que caracteriza a la superficie de ensayo, siendo éste el utilizado para la evaluación de la explanada.

Para la obtención de las correlaciones entre los ensayos de carga estáticos y dinámicos debe tenerse muy en cuenta 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 dinámica tiene un diámetro de 600 mm. En función del tamaño de placa utilizado, variará el espesor de material cuyas características se están analizando.

Ejemplo de Explanadas ejecutadas con Materiales Granulares

Los resultados que se recogen a continuación proviene de datos obtenidos en la recepción con placa de carga dinámica de explanadas (o capas de sub-balasto y capas de forma de plataformas ferroviarias) constituidas por materiales granulares.

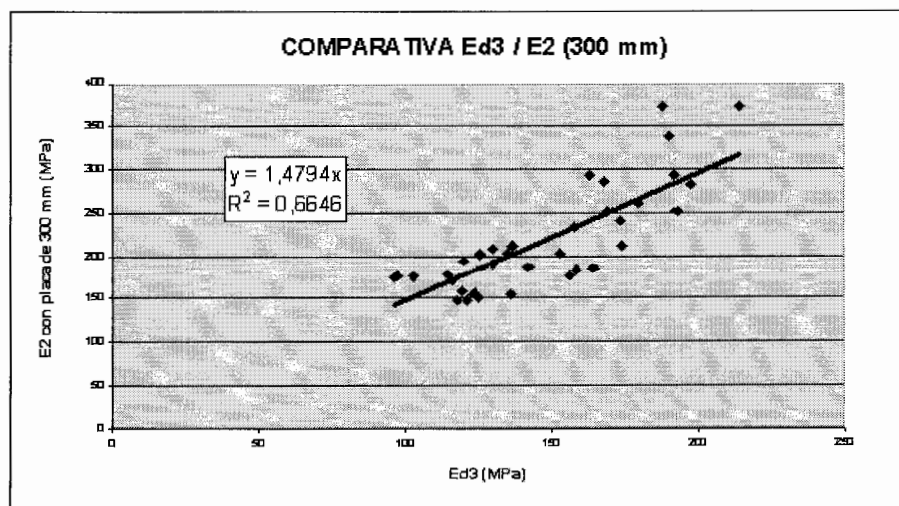


Figura.11. Correlación módulos dinámico Ed3-estático E2 (placa 300 mm)

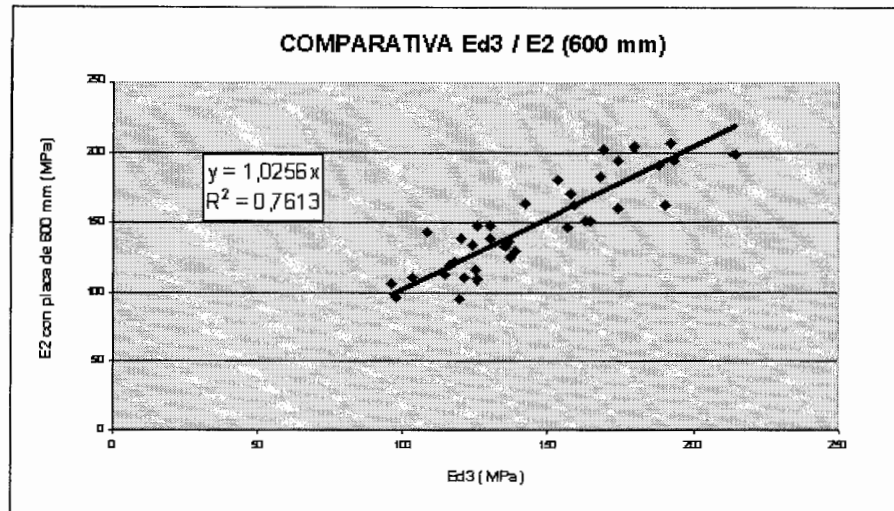


Figura.12. Correlación módulo dinámico Ed3- estático E2 (placa 600mm)

Se ha analizado la correlación existente entre los módulos obtenidos en el segundo ciclo de carga estática y los correspondientes al tercero de carga dinámica. De dicha comparativa 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:

$$E2 (300 \text{ mm}) \approx 1,5 \times Ed3$$

$$E2 (600 \text{ mm}) \approx Ed3$$

siendo:

E2 (300 : Módulo de compresibilidad del segundo ciclo de carga estática con placa de 300 mm. de diámetro (MPa)

E2 (600 : Módulo de compresibilidad del segundo ciclo de carga estática con placa de 600 mm. de diámetro (MPa)

Ed3 : Módulo bajo carga dinámica obtenido en el tercer ciclo de carga, con placa de 600 mm de diámetro (MPa)

Esta equivalencia obtenida entre el módulo del tercer ciclo del ensayo de placa de carga dinámica y el correspondiente al segundo ciclo de carga estática con placa de 600 mm. de diámetro, está en consonancia con lo recogido en el Catálogo francés de estructuras tipo de carreteras 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.

Ejemplo de Explanadas ejecutadas con Suelos Estabilizados

En parte de las obras ejecutadas con suelos estabilizados recientemente 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. El 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.

En estas obras también se han realizado algunos ensayos de placa de carga estática que han permitido 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. A continuación se adjuntan datos obtenidos en la recepción con placa de carga dinámica de un suelo estabilizado con cemento.

Resumen Estadístico Ed3		Mpa	% acumulado
Media	133,31	100	26%
Desviación estándar	45,97	120	44%
Varianza de la muestra	2.113,52	140	58%
Rango	209,00	160	71%
Mínimo	41,00	180	83%
Máximo	250,00	200	90%
		y mayor...	100%

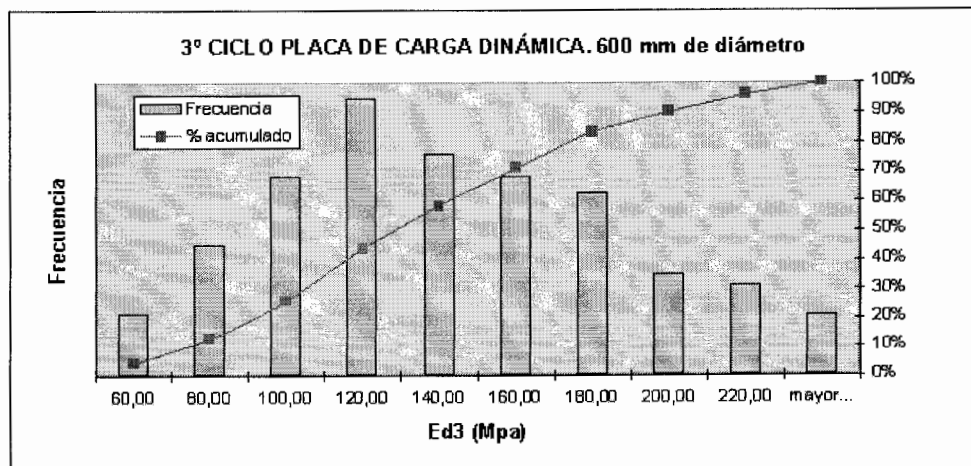


Figura.13. Resumen estadístico de Ed3 con placa de carga dinámica. Suelo estabilizado con cemento

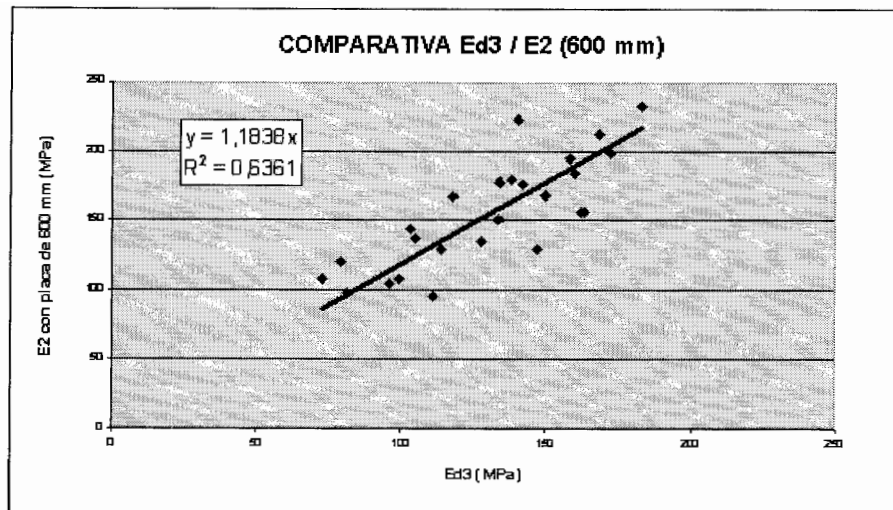


Figura.13bis. Correlación entre módulo dinámico Ed3 y módulo estático E2 (obtenido con placa de 600 mm). Suelo estabilizado con cemento.

6. CONTROL POR PROCEDIMIENTO: BANDAS DE ENSAYO

6.1. Introducción

Una manera muy recomendable de establecer a priori la forma más adecuada de efectuar la compactación consiste en construir secciones de ensayo. En ellas se pueden probar distintos tipos de maquinaria, espesores de tongada, número de pasadas, variaciones de humedad, etc. El control de los resultados que se van obteniendo se puede llevar con cualquiera de los procedimientos que se han descrito en los apartados anteriores, si el material que se está tratando es apropiado para ellos.

Las secciones de ensayo no suelen estar justificadas más que cuando los materiales son relativamente homogéneos y se trata de canteras importantes, ya que de lo contrario resultan antieconómicas. Hay situaciones, sin embargo, en que pueden ser especialmente necesarias; éste es el caso cuando se trata de materiales cuyo comportamiento durante su puesta en obra y compactación es difícil de prever, como son los suelos especiales, las rocas blandas y evolutivas y los pedraplenes en general.

Un procedimiento que suele utilizarse para ir controlando el efecto de la maquinaria consiste en seguir los asientos que se van produciendo después de las sucesivas pasadas de la maquinaria en la tongada considerada. Con este fin suelen colocarse claves en puntos convenientemente distribuidos y que se señalan pintándolos con cal.

Asimismo, suelen abrirse calicatas para inspeccionar el estado en que queda el material. Incluso se determina el peso específico aparente en estas calicatas excavándolas con las dimensiones y geometría apropiadas, para determinar su volumen, además del correspondiente peso del material extraído, y deducir la porosidad que resulta.

Sin llegar a la construcción de secciones de ensayo propiamente dichas, como pudieran considerarse las totalmente independientes del relleno a efectuar, pueden conseguirse resultados muy útiles recurriendo a modo experimental a tongadas que quedan después incorporadas en el relleno primitivo, a menos que se consideren inadecuadas por algún motivo.

6.2. Secciones de ensayo para pedraplenes

El control de los pedraplenes y todo-uno se realiza mediante:

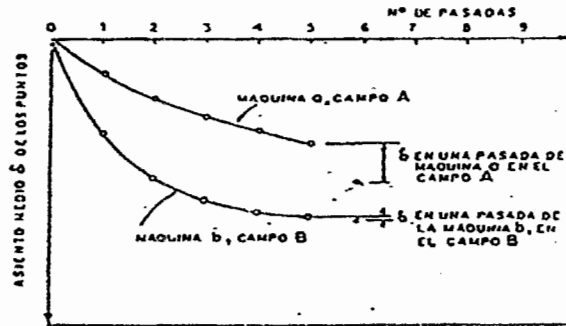
- 1) Control de espesor de tongada.
- 2) Control de los compactadores y número de pasadas.
- 3) Control topográfico de asientos (mediante nivelación desde bases fijas).
- 4) Pesaje de camiones.
- 5) Realización de catas grandes.

Las calicatas serán del orden de 2 m de diámetro, según el espesor de la tongada. En ellas, se determina la densidad y/o porosidad, dividiendo el peso del material extraído por el volumen de la cata.

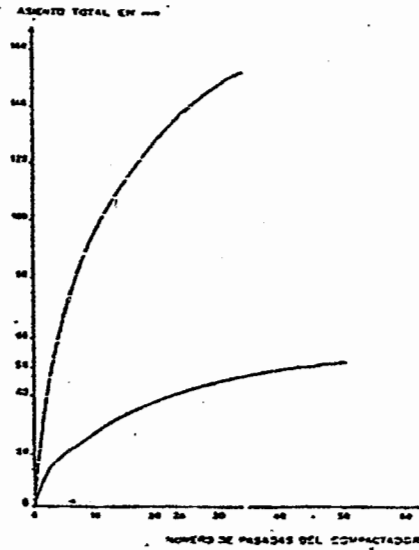
Los asientos de la capa compactada es el punto más importante de comprobación de todos los controles que se ejercen sobre el producto terminado. Deben comprobarse por nivelación desde bases fijas que sirven también para la comprobación de la densidad. Un método sencillo consiste en colocar sobre la capa que se ha de compactar una serie de placas de hierro, por ejemplo de 10 a 20, de unos 10 x 10 cm sujetas con un clavo, parecido a una chincheta, y a una distancia de 1 m entre sí. Después de cada pasada de la compactadora se miden los asientos con un nivel, los cuales reflejan el grado de compactación.

El curso de la curva de asientos indica el número de pasadas a partir del cual termina la deformación, es decir, el punto en el que ya no se produce apenas compactación (figura.14).

Si se quiere comprobar la eficacia de una segunda máquina compactadora, entonces se disponen los mismos puntos de medición en un material similar al que se acaba de ensayar, midiéndose luego los asientos después de cada pasada de la máquina; resulta fácil decidir cuál de las máquinas ensayadas consigue mejor grado de compactación. Para un mejor control se puede hacer una pasada con la máquina "a", con lo cual se comprueba que la máquina "b" es aún capaz de conseguir una mayor compactación.



ASIENTO MEDIO DE UNA TONGADA EN FUNCION DEL Nº DE PASADAS DE DOS MAQUINAS DE COMPACTACION.



TORRESA	TIPO DE COMPACTADOR	CANTIDAD EN CADA UNIDAD DE GEOMETRIA (m ²)
P. DE BOUCHAM	VIBRANTE 25430	726
P. DE BOULAY	VIBRANTE AUTOPULSADO	230

— PRESA DE BOUCHAM (PASADO $R_0 = 40 \text{ kg/cm}^2$)
 - - - PRESA DE BOULAY (PASADO $R_0 = 75 \text{ kg/cm}^2$)

Figura.14.

Una vez elegida la máquina más apropiada, se puede fijar el número de pasadas, así como el asiento medio admisible entre dos pasadas como medida para el ensayo de recepción de la obra. Para el control se vuelven a colocar unas 10 ó 20 placas y se clavan en el suelo con ayuda de la máquina compactadora. A continuación, se fija el cero del instrumento y después de pasar la máquina se determina el asiento medio de los puntos de control basándose en las dos lecturas.

6.3. Secciones de ensayo en material todo-uno

El material en cuestión objeto de este ejemplo ilustrativo consistía en una mezcla de bolos de granito, granito alterado y jabre, que por sus características granulométricas no resultaba inicialmente encuadrable en lo que se suele exigir a los materiales para pedraplenes (por exceder del 30% el contenido en peso de partículas que pasan por el cedazo 25 UNE, y, de igual modo, sería inadecuado para terraplenes, pues el porcentaje de piedras cuyo tamaño excede de 15 cm supera el 25%).

De otros ensayos en laboratorio disponibles sobre muestras de este material, se dedujo que carece de plasticidad, y que sus contenidos en sulfatos, carbonatos y materia orgánica son prácticamente nulos. Los ensayos de apisonado Proctor modificado realizados con la porción de suelo inferior a 20 mm dan humedades óptimas de compactación en torno al 12% y densidades máximas del orden de 2 g/cm^3 .

A la vista de ello, se decidió la realización de unas bandas de ensayo para determinar la aptitud de este material para ser utilizado en los núcleos de los terraplenes de la obra mediante el análisis de su comportamiento in situ.

Para ello, se compactó una primera banda de ensayo para determinar las condiciones de compactación óptimas del material en cuestión. Se trataba de determinar la humedad adecuada y el número de pasadas óptimo sobre tongadas de 60 cm y de 80 cm; se consideró conveniente estudiar estos dos espesores considerando la granulometría del material y su posible variación a lo largo de la traza, habida cuenta de que el tamaño máximo de grano nunca debe superar los dos tercios del espesor de la tongada. Para compactar la tongada, se utilizó un rodillo vibratorio de 15 t de peso estático (tambor de 10,4 t de peso).

La banda, de 51 m de longitud, y constituida por una sola tongada, se ha dividido en dos zonas de 24 m cada una, en las que el espesor de tongada ha sido de 60 cm y 80 cm, respectivamente, separadas por una zona de transición de 3 m. A su vez, los 24 m de banda correspondientes a cada espesor de tongada se han dividido en dos zonas, compactadas con las humedades A y B. La humedad A ha sido la correspondiente a proporcionar la óptima Próctor modificado al material que pasa por el tamiz 3/4" (20 UNE), extrapolada al total del peso seco; la humedad B ha sido la humedad A más tres puntos.

El ancho de la banda de ensayos fue de 12 m, dividido en tres franjas de 4 m a todo lo largo compactadas con 4, 6 y 8 pasadas de rodillo, respectivamente. Como ensayos de control, se realizaron los siguientes:

- 1) Ensayos de huella (según la norma suiza SNV 670.365).
- 2) Ensayos de placa de carga (con placa de 60 cm, y según la norma alemana DIN 18134).
- 3) Determinación de densidad in situ, excavando una cata de aproximadamente 1,5 m x 1,5 m y con una profundidad igual al espesor de la tongada, y determinando el volumen llenándola de agua con ayuda de una lámina de plástico (del material excavado se determinaba la granulometría).

En cada una de las 12 subzonas correspondientes a un determinado espesor de tongada, humedad y número de pasadas del compactador, se realizó un ensayo de huella y una medición de humedad. El número de ensayos de placas de carga ha sido de 5; las determinaciones de densidad in situ por el método de la cata y la lámina de plástico han sido dos, una en la zona de 60 cm de espesor de tongada y otra en la de 80 cm.

A la vista de los resultados obtenidos (tablas I, II y III) y teniendo en cuenta el objeto de esta banda, se concluyó lo siguiente:

- Con ambos espesores de tongada, los resultados de los ensayos de huella fueron claramente mejores en las zonas compactadas con la humedad natural del material (de media, 7,2%), en las zonas compactadas con la humedad B (de media, 9,3%), zonas en las que se añadió agua mediante regado.
- Con relación al número de pasadas, los ensayos de huella muestran una clara mejoría del comportamiento del material entre 4 y 6 pasadas, y entre 6 y 8 pasadas, en todos los casos.
- Los resultados de los ensayos de placa de carga manifiestan un buen comportamiento del material en general. El peor valor de la razón de módulos, E_{v2}/E_{v1} , se obtuvo en el ensayo P-3, en la zona de humedad B de la tongada de 80 cm, compactada con seis pasadas del rodillo; aún así, este valor fue de 3,3. El valor del módulo E_{v2} osciló, en los distintos ensayos, entre 500 y 662 kg/cm².
- Se observó una notable diferencia de densidad entre la cata realizada en tongada de 80 cm compactada con la humedad natural y 4 pasadas del rodillo (2,37 t/m³, densidad húmeda), y la cata correspondiente a tongada de 60 cm compactada con la humedad natural y 8 pasadas del rodillo (2,64 t/m³).

Como síntesis, cabe señalar que este material analizado denominado "de transición", formado por una mezcla de bolos de granito, granito alterado y jabre, no era encuadrable pues ni como material de pedraplén ni como terraplén (según el actual PG-3) ha sido estudiado por medio de este tipo de bandas como material para núcleo de rellenos, y ha dado, en principio, unos resultados satisfactorios en los que a su comportamiento geotécnico como obra de tierra se refiere.

TABLA I

RESULTADOS ENSAYO DE LA HUELLA. PRIMERA BANDA DE ENSAYO

Espesor tongada	Humedad	Nº de pasadas	Descenso medio
60 cm	A (7,7%)	4	4,4 mm
		6	3,7 mm
		8	0,9 mm
	B (9,9%)	4	6,9 mm
		6	4,7 mm
		8	4,4 mm
80 cm	A (6,8%)	4	5,4 mm
		6	4,7 mm
		8	1,8 mm
	B (8,8%)	4	7,4 mm
		6	4,9 mm
		8	4,4 mm

TABLA II

RESULTADOS DE ENSAYOS DE PLACA DE CARGA.
PRIMERA BANDA DE ENSAYO

Ensayo	Espesor tongada	Zona de humedad	Humedad local (%)	Nº de pasadas	E_{11} (kg/cm ²)	E_{22} (kg/cm ²)	E_{11}/E_{22}
P-1	80 cm	A	6,2	6	211	590	2,79
P-2	60 cm	B	8,8	6	261	562	2,15
P-3	80 cm	B	9,0	6	198	662	3,34
P-4	80 cm	A	7,8	4	228	500	2,19
P-5	60 cm	A	8,4	8	180	527	2,92

TABLA III

RESULTADOS DE DENSIDAD IN SITU Y GRANULOMETRIA EN LAS CATAS 1 Y 2 DE LA
PRIMERA BANDA DE ENSAYO

Cata	Densidad húmeda (t/m ³)	Humedad (%)	Granulometría (% pasa)				
			< 165 mm	#40	#25	#10	#0,080
1	2,37	6,25	85,8	50,7	44,1	37,4	5,6
2	2,64	6,2	94,7	64,5	57,1	49,7	7,1

ESPEORES DE CAPA (Antes de compactar)	DEFINICION ESQUEMATICA DE LAS BANDAS DE ENSAYO			
	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	Extendido: Motorveladora	Extendido: Motorveladora	Extendido: Motorveladora	Extendido: HANOMAG (Pala Cabre)
	Nivelador: Motorveladora	Nivelador: Motorveladora	Nivelador: Motorveladora	Nivelador: Motorveladora
	Riego: NO	Riego: NO	Riego: NO	Riego: NO
	Compactador: HANOMAG (Pala Cabre) + BOMAG 217 (Vibrador)	Compactador: HANOMAG (Pala Cabre)	Compactador: BOMAG 217 (Vibrador)	Compactador: BOMAG 217 (Vibrador)
	Nº PASADAS: 6 (Pala Cabre) + 2 BOMAG	Nº Pasadas: 6 (Pala Cabre)	Nº Pasadas: 6	Nº Pasadas: 4
30 cm	SI	SI	SI	SI
40 cm	SI	SI	SI	SI
50 cm	SI	SI	SI	SI

CUADRO A

BANDAS DE ENSAYO
SITUACION DE TOMA DE RESULTADOS

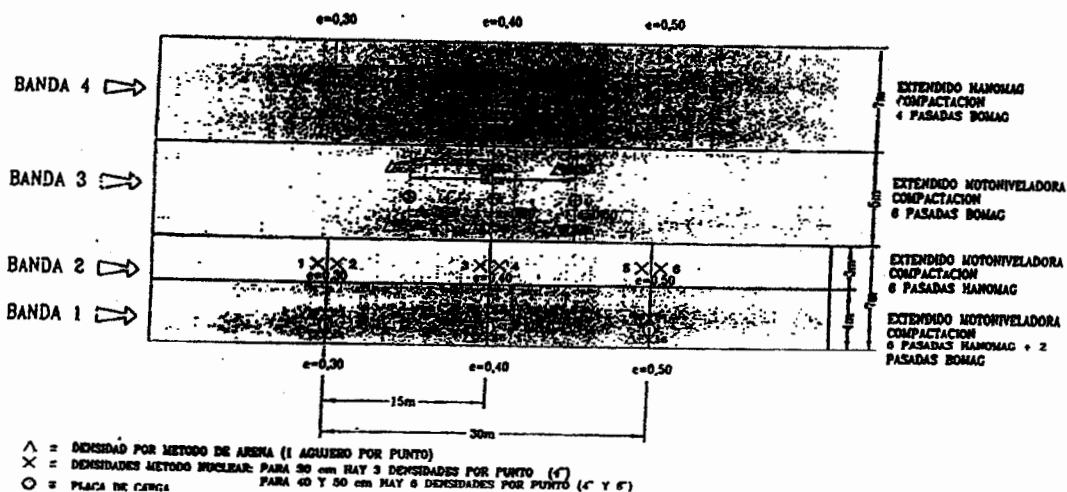
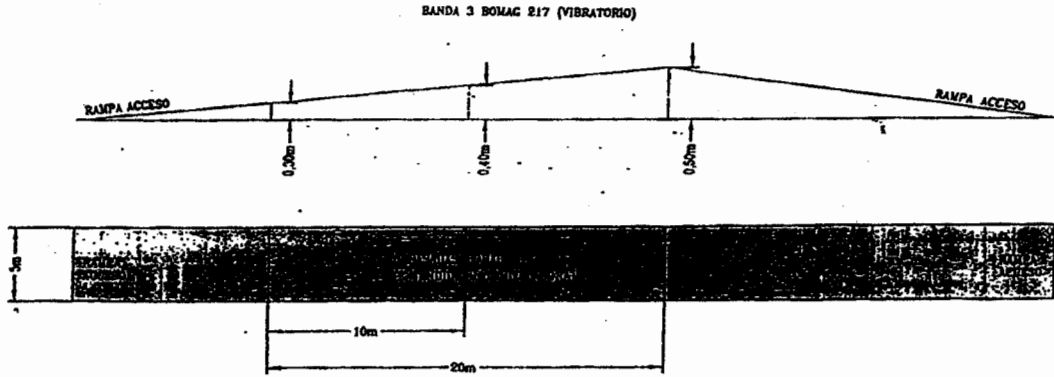


Figura.15.

DEFINICION GEOMETRICA DE LA BANDA DE ENSAYO



BANDAS 1, 3 Y 4
RELACION DENSIDAD ARENA - ESPESOR DE CAPA

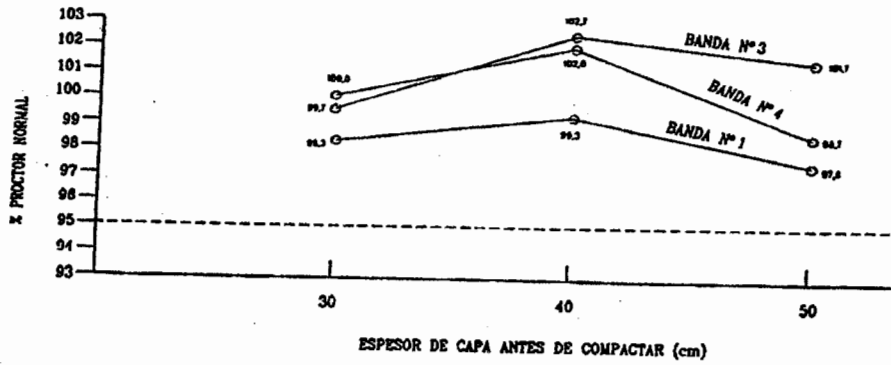


Figura.16.

PLACAS DE CARGA

BANDA	ESPELOR (metros)	Módulo M_1	Módulo M_2	Relación M_2/M_1	Observaciones
1	e = 0,3 m	47	135	2,9	Pata de Cabra (6 Pas) + Bomag (2 Pas)
1	e = 0,4 m	48	130	2,7	
1	e = 0,5 m	51	158	3,1	
3	e = 0,3 m	51	221	4,3	BOMAG 217 (6 Pas)
3	e = 0,4 m	48	210	4,4	
3	e = 0,5 m	48	135	2,8	
4	e = 0,3 m	67	273	4,0	HANOMAG (Ext) BOMAG 217 (4 Pas)
4	e = 0,4 m	44	316	7,1	
4	e = 0,5 m	27	229	8,5	

CUADRO B

6.4. Secciones de ensayo para suelos especiales y marginales

Con las nuevas tendencias a la utilización de la mayor cantidad de los materiales disponibles en las obras de rellenos compactados, es más probable que se plantee la necesidad de recurrir a ensayos que representen mejor y más directamente el comportamiento de ese material bajo el efecto de la compactación, así como sus propiedades geomecánicas como producto terminado (resistencia, deformabilidad) que son las que estarán más íntimamente ligadas al dimensionamiento de la estructura de tierra y firme correspondiente.

En este tipo de casos, es muy conveniente proceder a realizar ensayos in situ de compactabilidad, por medio de bandas de ensayo, pues además el conocimiento y la experiencia de trabajar con ellos es mucho menor, cuyo objetivo ahora es doble: probar diverso tipo de maquinaria, y poner a punto el procedimiento.

En el ejemplo que aquí se expone, se trataba de un suelo limoarcilloso, con una fracción fina predominante (clasificado como ML-MH según la zona de extracción) que además a veces constituía terrones, glomérulos, etc, que dificultaban su tratamiento en la tongada. Por ello, además del espesor de tongada, número de pasadas del compactador, etc, se emplearon diversos tipos de compactador (incluyendo el de pata de cabra, para deshacer los terrones) y procedimientos mixtos entre ellos (según se refleja en el cuadro A y figuras. 15 y 16, donde se describen sucintamente las pruebas realizadas).

Como sistema de evaluación de resultados, se emplearon los clásicos de determinación de la densidad in situ por el método de la arena y nuclear, pero se complementaron con ensayos in situ de carga con placa, que son los que realmente permiten determinar las características y parámetros geomecánicos del material compactado, y que nunca deberían ser olvidados en un tipo de pruebas como esta.

Los resultados obtenidos en los ensayos de control se recogen en el cuadro B, determinándose la admisibilidad en base al valor de la relación entre módulos de carga noval y recompresión ($k = E2/E1$) y del módulo de recompresión ($E2$) según los criterios al uso.

De este modo, se consigue determinar tanto la factibilidad de la utilización del material probado en el relleno correspondiente, como además el método de trabajo (procedimiento de ejecución) y sistema de control más adecuado.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, E. (1989). "Efectos del agua en el comportamiento de terraplenes y pedraplenes". Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias. Torremolinos.

- British Standard Institution (1981): "Code of Practice for Earthwork"
BS 5031.
- Centeno, C., Sopeña, L. y Fernández-Cuenca, J.A. (1998). "Utilización de materiales no conformes a especificaciones en terraplenes de carreteras". I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada.
- Cuéllar, V. (1994,a). "Auscultación de terraplenes mediante ondas superficiales". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, 28-30 Septiembre. p. 519.
- Eggestad, A. (1.974): "A new method for compaction control of sand". Goetechnique, Vol. 24, nº 2, pp 141-153.
- Escario, V. (1987). "Terraplenes y Pedraplenes". Dirección General de Carreteras, MOPU. Madrid.
- González Cañibano, J., Pardo de Santayana, F. y Torres Alonso, M. (1994). "Utilización de estériles de carbón en rellenos de tierra reforzada". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, 28-30 Septiembre. p. 531.
- Hansbo, S y Pramborg, B. (1980): "Compaction Control". Proc. of the International Conference on Compaction. Paris. Pp 559-564.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1973): "Essai a la plaque".
Dunod, 11 págs.
- Oteo, C. (1994). "Reglas generales de proyecto de terraplenes". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, 28-30 Septiembre. p. 183.
- Pardo de Santayana, F., Oteo, C., Sopeña, L. y Miró, C. (1994,b). "Soluciones geotécnicas para los terraplenes del Parque Tecnológico de Andalucía. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, 28-30 Septiembre. p. 291.
- SETRA-LCPC (1992). Guide technique "Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule 1, 100 pages et Fascicule 2, 104 pages.
- Sopeña, L. (1998). "Utilización de cenizas volantes en rellenos compactados". II Congreso Hispano-Luso de Carreteras y Medio Ambiente. Torremolinos. Junio.
- Sopeña, L. (1998). "Materiales para terraplenes". Curso Internacional de Mecánica del Suelo. Gabinete de Formación y Documentación. CEDEX. Madrid.
- Sopeña, L. y González Cañibano, J. (1998). "Estériles del carbón como material de relleno para estructuras de tierra reforzada". II Congreso Hispano-Luso de Carreteras y Medio Ambiente. Torremolinos. Junio.
- Sopeña, L. (1999). "Nuevas técnicas en la concepción, proyecto y ejecución de terraplenes". Master de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. Gabinete de Promoción y Documentación. CEDEX. Madrid.
- Soriano, A. (1994). "Características del comportamiento de terraplenes y pedraplenes". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, 28-30 Septiembre. p. 207.
- Vachon, C. (1998). "Calibration for soil compaction for the ultra-light dynamic penetrometer". Memoire CUST-Clermont-Ferrand. Sept.
- Valerio, J. (1990). "Estudio de sistemas multicapa mediante la propagación de ondas superficiales (2ª Fase)". Laboratorio de Geotecnia. CEDEX, Madrid.
- VSS, (1981): "Suelos. Ensayos de placa". Norma suiza SNV-670317a.
- VSS, (1973): "Compactación por eje de 10 Tn". Norma suiza SNV-670365.
- VSS, (1972): "Compactación. Métodos de control". Norma suiza SNV-640586.