

COMPARACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE CONTROL DE COMPACTACIÓN DEL SUBBALASTO

Eduardo Santiago Recuerda, *Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España*

José Luis García de la Oliva, *Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España*

Pedro González Paniagua, *ADIF, Madrid, España*

RESUMEN

En el presente artículo se describe la campaña de campo realizada para comparar diferentes equipos de control del grado de compactación del subbalasto y se comentan algunas conclusiones a la vista de los resultados obtenidos en un tramo de ensayo.

Los equipos incluidos en esta campaña han sido: Ensayo de carga con placa, para diámetros de 300 y 600 mm; Método nuclear para la determinación de densidad y humedad; Portancímetro; Ensayo dinámico de carga con placa de 300 mm (equipo de ensayo ligero HMP); Ensayo dinámico de carga con placa de 600 mm (Dinaplaca); Geogauge y Penetrómetro dinámico (Panda).

En el emplazamiento se han llevado a cabo dos tipos de ensayos. En una primera zona se compactaron cuatro tramos contiguos con distinto grado de compactación mediante 2, 3, 5 y 7 pasadas dobles de compactador y se realizaron los ensayos con los distintos equipos. En la segunda zona se realizaron pasadas de compactador hasta llegar a las ocho pasadas, entre pasadas sucesivas se iban realizando los ensayos.

Los resultados obtenidos muestran, salvo para los ensayos de determinación de densidad, una evolución temporal del parámetro registrado. Estos parámetros aumentan con el tiempo, presentando un mayor incremento en las zonas mejor compactadas. Se plantea la necesidad de fijar un plazo de ejecución del ensayo desde la compactación de la capa de cara a definir valores para los ensayos.

Se ha evaluado la validez de los ensayos de control de la compactación del subbalasto incluidos actualmente en los Pliegos de prescripciones ferroviarios españoles y se plantean posibles mejoras. Para el resto de equipos analizados se estiman posibles límites que separen zonas de validez para la compactación del subbalasto.

Se apuntan futuras líneas de investigación para analizar los fenómenos observados así como la necesidad de continuar con la experimentación en otros tramos ferroviarios que permitan generalizar las conclusiones de este estudio.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del convenio existente entre el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la "realización de trabajos de investigación y desarrollo tecnológico de interés de ADIF y del CEDEX en el cuatrienio 2006-2009" se incluyó la ficha nº 4, "Validación de un método continuo de comprobación del grado de compactación y módulo de deformación del subbalasto".

El objetivo de este trabajo era comparar diferentes técnicas de medida "in situ" para determinar con criterios técnico-económicos el método más adecuado para medir el grado de compactación del subbalasto y el módulo de deformación del mismo.

Tras una primera fase de identificación de las posibles técnicas a emplear se seleccionaron las más adecuadas para efectuar los trabajos posteriores de contraste. Las técnicas seleccionadas fueron:

- Ensayo de carga con placa, para diámetros de 300 y 600 mm.
- Método nuclear para la determinación de densidad y humedad (Troxler).
- Portancímetro.
- Ensayo dinámico de carga con placa de 300 mm (equipo de ensayo ligero HMP o placa alemana).
- Ensayo dinámico de carga con placa de 600 mm (dinaplaca).
- Geogauge.
- Penetrómetro dinámico (Panda).

Con estos equipos se realizó una campaña de campo en la línea de alta velocidad Madrid-Levante.

La campaña se llevó a cabo durante los meses de septiembre y octubre de 2008.

En este artículo se describe la campaña de ensayos y se resumen los resultados más significativos obtenidos en la misma.

2 DESCRIPCIÓN DE LA EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para la realización de la campaña de ensayos se seleccionaron dos emplazamientos en la línea de alta velocidad Madrid-Levante. Se trata de dos tramos, el tramo 1 de 360m de longitud, (puntos kilométricos de proyecto 8+450 a 8+810) y el tramo 2 de 90m (puntos kilométricos 5+470 a 5+560).

2.1 Tramo 1

El tramo de ensayos se dividió en tres subtramos, uno con 5 pasadas dobles de compactador y los otros dos subtramos con una compactación deficiente. La tramificación definida fue:

- Subtramo con 3 pasadas dobles de compactador del P.K. 8+810 al 8+690
- Subtramo con 5 pasadas dobles de compactador del P.K. 8+690 al 8+570
- Subtramo con 2 pasadas dobles de compactador del P.K. 8+570 al 8+450

Sobre ellos se realizaron dos tipos de medidas:

- Medidas puntuales alrededor de los ensayos de placa estática para poder comparar los valores de todos los aparatos en zonas concretas.
- Medidas sobre alineaciones longitudinales a lo largo de los tramos aprovechando el rendimiento de los equipos en estudio.

Del lunes 8 de septiembre hasta el jueves 11 de septiembre de 2008 se trabajó sobre los tres subtramos citados. Los días 10 y 11 de septiembre se procedió a regar una zona en cada subtramo en estudio con el objeto de comparar los valores obtenidos con los equipos para distinto grado de humedad del subbalasto. Estas zonas fueron:

- Riego en toda la plataforma del P.K. 8+625 al 8+655, dentro del subtramo de cinco pasadas.
- Riego en la margen izquierda de la plataforma del P.K. 8+730 al 8+750, dentro del subtramo con tres pasadas.
- Riego en la margen izquierda de la plataforma del P.K. 8+490 al 8+505, dentro del subtramo con dos pasadas.

Si bien efectivamente se registró mediante los métodos nucleares un cambio de humedad en esas zonas las medidas con los diferentes equipos no

reflejaron una variación acorde de los parámetros registrados.

Ante el análisis de los resultados que se iban obteniendo, el jueves día 11 de septiembre se decidió compactar de tres a siete pasadas dobles el subtramo comprendido entre los P.K. 8+810 a 8+690.

El día 17 de septiembre los equipos volvieron a estos subtramos para estudiar la evolución de las medidas con el tiempo.

La última medida con los equipos sobre este tramo se realizó el día 1 de octubre de 2008 aprovechando la campaña sobre el tramo 2.

Una vez realizada la campaña los subtramos con compactación deficiente se recompactaron hasta alcanzar las condiciones previstas en la obra.

2.2 Tramo 2

Los días 1 y 2 de octubre de 2008 se procedió a realizar una serie de ensayos sobre este tramo de 90 metros que fue compactado mediante un rodillo Bomag BW 211 D-4 instrumentado, llevado a la obra ex profeso.

Adicionalmente se procedió a medir con otros equipos entre pasada y pasada. Los equipos utilizados en este tramo fueron:

- Ensayo de carga con placa de 300 mm de diámetro.
- Método nuclear para la determinación de densidad y humedad (Troxler).
- Portancímetro.
- Ensayo dinámico de carga con placa de 300 mm (equipo de ensayo ligero HMP o placa alemana).
- Ensayo dinámico de carga con placa de 600 mm (dinaplaca).

Se realizaron 7 pasadas dobles con el compactador el día 1 de octubre con las correspondientes medidas de equipos entre pasadas. Las medidas se realizaron a lo largo de dos alineaciones, la primera coincidente sensiblemente con el eje de vía derecho y la segunda a metro y medio hacia el borde de plataforma. Al día siguiente, día 2 de octubre, se realizó una pasada doble adicional.

3 ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS CON LOS EQUIPOS

En este apartado se van a analizar por separado los datos obtenidos en la campaña de campo recogidos por cada equipo. De esta forma se pueden extraer algunas conclusiones de su utilidad en la caracterización de la compactación de la capa de subbalasto.

3.1 Ensayo de placa con carga de 300 mm.

Este ensayo se ha realizado por ser el incluido en los Pliegos de condiciones técnicas habituales en obras de infraestructura ferroviaria. Los criterios que contemplan para el subbalasto suelen fijar valores para el módulo del segundo ciclo de carga ($E_{v2} > 120$ Mpa) y para la relación entre módulos del segundo y primer ciclo de carga. ($E_{v2}/E_{v1} < 2,2$). Se ha realizado una revisión crítica de los mismos.

A la vista del conjunto de datos se puede indicar que:

- El criterio basado en el valor de E_{v2} no arroja información sobre el grado de compactación del subbalasto. Todos los ensayos han superado el límite de 120 MPa, incluyendo zonas de compactación deficiente (compactación deficiente por el número de pasadas, la densidad alcanzada e incluso el aspecto superficial de la capa). Ver Figura 1.

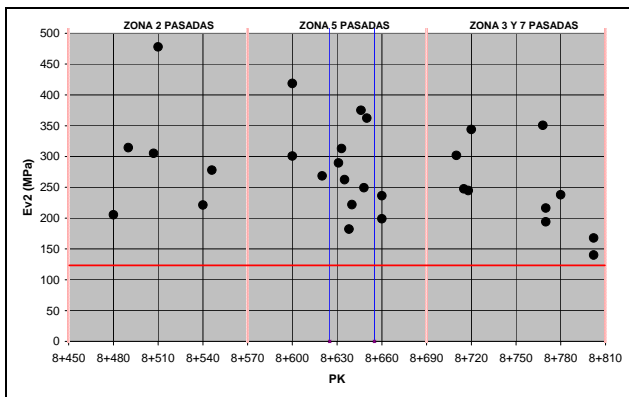


Figura 1. E_{v2} -P.K.

- El criterio del cociente entre E_{v2}/E_{v1} sin alguna referencia al valor obtenido en el primer ciclo de carga E_{v1} no ha permitido diferenciar entre tramos con diferente grado de compactación. De los ensayos realizados, el 93% no lo cumple al superar el valor fijado de 2,2, esto ocurre independientemente de si se hicieron en zona bien o mal compactada. Únicamente cumplen este criterio los dos ensayos realizados a más de 20 días desde la compactación siendo realizado uno de ellos en la zona de compactación más deficiente (2 pasadas). Ver Figura 2.

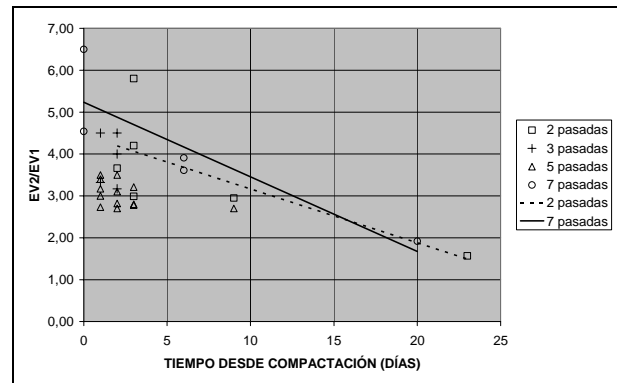


Figura 2. E_{v2}/E_{v1} -Tiempo desde compactación.

- En cuanto al criterio que fija la relación $E_{v2}/E_{v1} < 2,2$ cuando el valor de E_{v1} hubiese resultado inferior a 75 MPa (recogido en el PGP-2006 pero no en PGP-2008), parece que se encuentra fuertemente influenciado por el tiempo en el que se realizó el ensayo, por lo que parece también poco representativo del grado de compactación si no se tiene en cuenta el tiempo transcurrido desde la compactación de la capa. Ver figura 3.
 - o Cuando el ensayo se realiza a continuación de la compactación el criterio marca como zonas de compactación no válidas zonas con un alto número de pasadas de compactador (por ejemplo el subtramo con 7 pasadas en los que la densidad alcanza valores válidos).
 - o Si el ensayo se realiza entre 2 y 4 días tras la compactación, en general el criterio diferencia las zonas con 2 y 3 pasadas de la de 5 pasadas. Por el contrario en la zona de 7 pasadas (esta zona puede ser menos representativa por estar recompactada desde 3 pasadas), este criterio no da como válida la compactación del tramo con ensayos realizados a 6 días tras la compactación, con lo cual se puede interpretar que tampoco lo haría para un número menor de días (de 2 a 4)
 - o Por último, para más tiempo, por ejemplo a 9 y 20 días, el criterio ha dado como válidas todas las zonas lo que confirma la necesidad de incluir el tiempo transcurrido entre la compactación y la ejecución del ensayo en los criterios de aceptación.

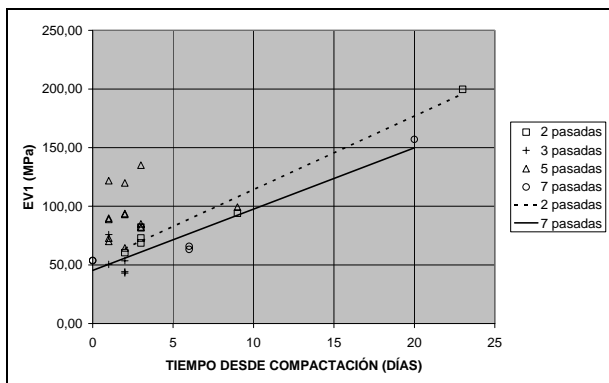


Figura 3. E_{v1} — Tiempo desde compactación.

- Se ha detectado un aumento en el valor de E_{v1} con el tiempo que parece dispararse en el periodo comprendido entre las medidas a 9 y 20 días.

3.2 Ensayo de placa con carga de 600 mm.

La placa de 600 mm parece menos adecuada para el estudio de una capa de 30 cm de espesor que la placa de 300 mm debido a que el bulbo de presiones afecta en mayor medida a los niveles inferiores.

Los resultados obtenidos muestran que el valor E_{v2} para este ensayo es en general menor que el de la placa de 300.

Sin embargo se observa que los valores de E_{v1} son del mismo orden que los obtenidos en los ensayos con placa de 300 mm para el mismo tiempo transcurrido desde la compactación. Estos valores de E_{v1} están comprendidos entre 40 y 110 MPa.

Los ensayos se realizaron entre uno y tres días tras la compactación de los tramos y los valores obtenidos no diferencian entre las compactaciones de 2, 3 y 5 pasadas dobles.

3.3 Método nuclear para la determinación de densidad y humedad.

Los requisitos que exige el Pliego PGP-2006 en su apartado G10F Subbalasto en cuanto a densidad de la capa de subbalasto compactada son: “la capa compactada presentará una densidad seca equivalente, al menos, al cien por ciento (100%) de la obtenida en el ensayo Proctor Modificado, en la media de seis ensayos para cada lote, no siendo ningún valor inferior al 98%”.

El nuevo pliego PGP-2008, en el apartado citado, este punto queda redactado de la siguiente forma: “La media de los seis valores de densidad será mayor o igual que el 100% de la densidad máxima del Proctor Modificado obtenida en ese lote. Hasta dos de los seis valores podrán dar un resultado inferior al 100%, pero siempre superior al 98% de dicha densidad máxima”.

En relación con la humedad se indica: “Los ensayos de humedad tendrán carácter indicativo y no constituirán por sí solos base de aceptación o rechazo”.

Los valores de los ensayos Proctor Modificado realizados por la obra indican una densidad seca y humedad óptima de $2,27 \text{ t/m}^3$ y $5,5\%$.

Del análisis de los datos se puede deducir que:

- La densidad seca permite diferenciar zonas compactadas con distinta energía de compactación. Ver el cuadro 1 y la figura 4.

Cuadro 1: Resumen de las medidas de densidad seca.

Compactación	2 pasadas	3 pasadas	5 pasadas	7 pasadas
nº datos	13	8	31	17
media	2,16	2,20	2,24	2,26
máx.	2,28	2,29	2,31	2,31
mín.	2,09	2,15	2,16	2,21
desviac.	0,051	0,044	0,040	0,030

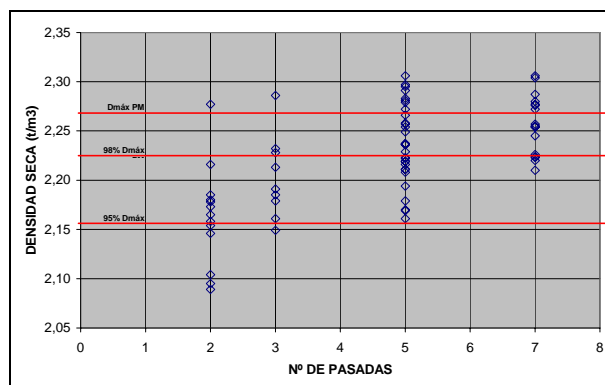


Figura 4. Densidad seca en función del número de pasadas.

- Parece deducirse que la densidad no sufre una evolución tras la compactación. La única medida que parece no cumplir este precepto es la mencionada del 1 de octubre (a 23 días) en el P.K. 8+490 (zona de dos pasadas), ver Figura 5.

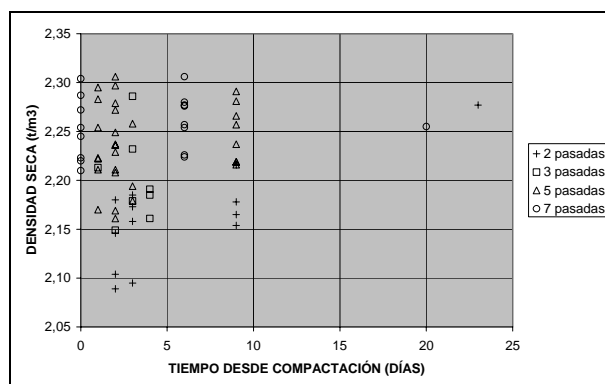


Figura 5. Densidad seca en función del tiempo desde la compactación.

- La evolución de la densidad seca obtenida por métodos nucleares refleja el aumento de la energía de compactación aplicada según se realizan las pasadas del compactador. En la figura 6 se muestran los datos tomados después de la primera pasada hasta la quinta pasada en las dos alineaciones ensayadas en el tramo 2. Se puede observar cómo en todos los puntos estudiados salvo uno, en el P.K. 0+540, se produce la mejora de la densidad con el número de pasadas. Se ha indicado con flechas la evolución de la densidad con las pasadas y se han enmarcado las zonas donde se ha producido una mejora de la misma.

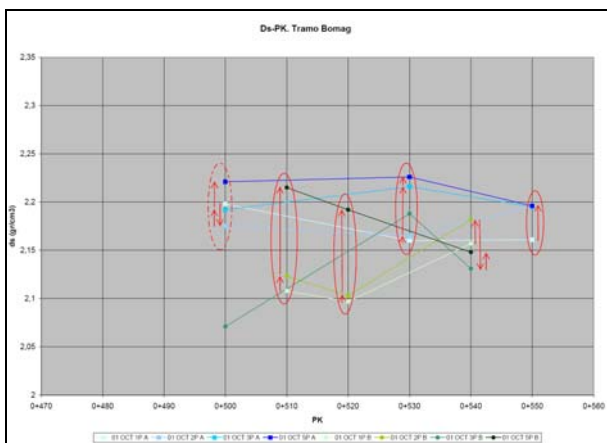


Figura 6. Densidad seca tras distintas pasadas del compactador

3.4 Ensayo con el Portancímetro.

De los datos analizados se puede concluir que:

- Las medidas tomadas con el portancímetro se ven afectadas por el tiempo, produciéndose un aumento de unos 50 Mpa en 8-10 días. Posteriormente este aumento parece estabilizarse. Ver figura 7.

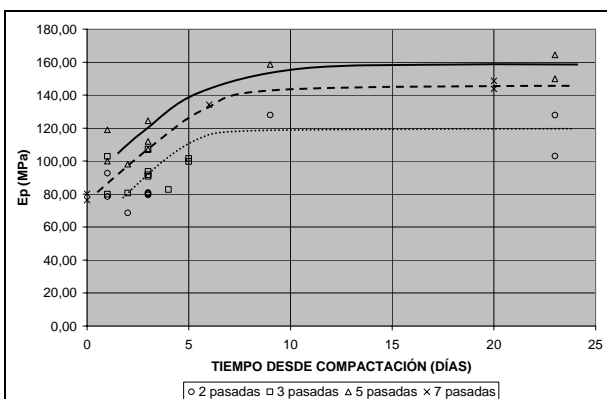


Figura 7. Módulo medio del portancímetro en función del tiempo desde la compactación.

- El portancímetro diferencia las zonas con distinto grado de compactación. A falta de más investigación del módulo obtenido con el portancímetro, unos límites en el entorno de los 120 MPa en medidas realizadas de 1 a 3 días tras la compactación, y 150 MPa en ensayos realizados para más de 3 días tras la misma, realizados sobre los ejes de vía, podrían separar los tramos aceptables de cara al control de la capa de subbalasto.
- La dispersión de las medidas aumenta también con el tiempo, posiblemente debido a la disgregación superficial de la capa de subbalasto.
- El portancímetro es capaz de diferenciar la evolución en el grado de compactación alcanzado según se van realizando las pasadas del compactador. En la figura 8 se observa que se registra mejoría en la mayoría de las zonas estudiadas, esta mejoría se ha remarcado en la figura mediante las flechas. La mejora oscila entre los 20 y 35 MPa de la primera a la cuarta pasadas, produciéndose la mayor mejora entre los P.K. 0+540 y 0+560. No se aprecia mejora en 20 de los 90 metros estudiados (zonas enmarcadas con sendos círculos) aunque tampoco disminuye el valor obtenido. Se puede apreciar asimismo que las zonas donde no mejora el módulo coinciden con las zonas donde menor módulo se obtiene tras cuatro pasadas.

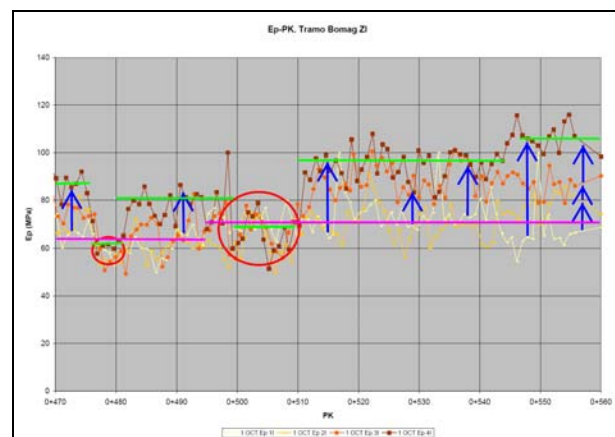


Figura 8. Módulo del portancímetro tras distintas pasadas del compactador

3.5 Ensayo dinámico de carga con placa de 300 mm.

De los ensayos realizados con la placa alemana, y a falta de una mayor investigación con medidas en otras localizaciones, puede concluirse que:

- El equipo no distingue entre tramos con diferente compactación si las medidas se

realizan justo después de la compactación o a los pocos días de ejecutada la misma.

En tres de los cuatro puntos analizados en el tramo 2, el valor obtenido tras cinco pasadas dobles del compactador era inferior al medido tras una pasada doble del compactador. De hecho en el único punto donde esto no ocurre se dispone de otro punto medido al día siguiente, en ese momento la capa presentaba ocho pasadas dobles de compactador y el valor obtenido es inferior al valor inicial de una

pasada. Es decir, en todos los puntos el valor final obtenido fue menor al valor de partida.

- Los valores del módulo obtenidos sufren una mejora con el tiempo que permitiría diferenciar entre tramos con diferente compactación. La mejora parece ser más acentuada en los tramos mejor compactados. Esto permitiría fijar un límite de aceptación en cuanto al grado de compactación del subbalasto en el entorno de los 60 MPa para un plazo de medida de unos 20 días tras la compactación. Ver figura 9.

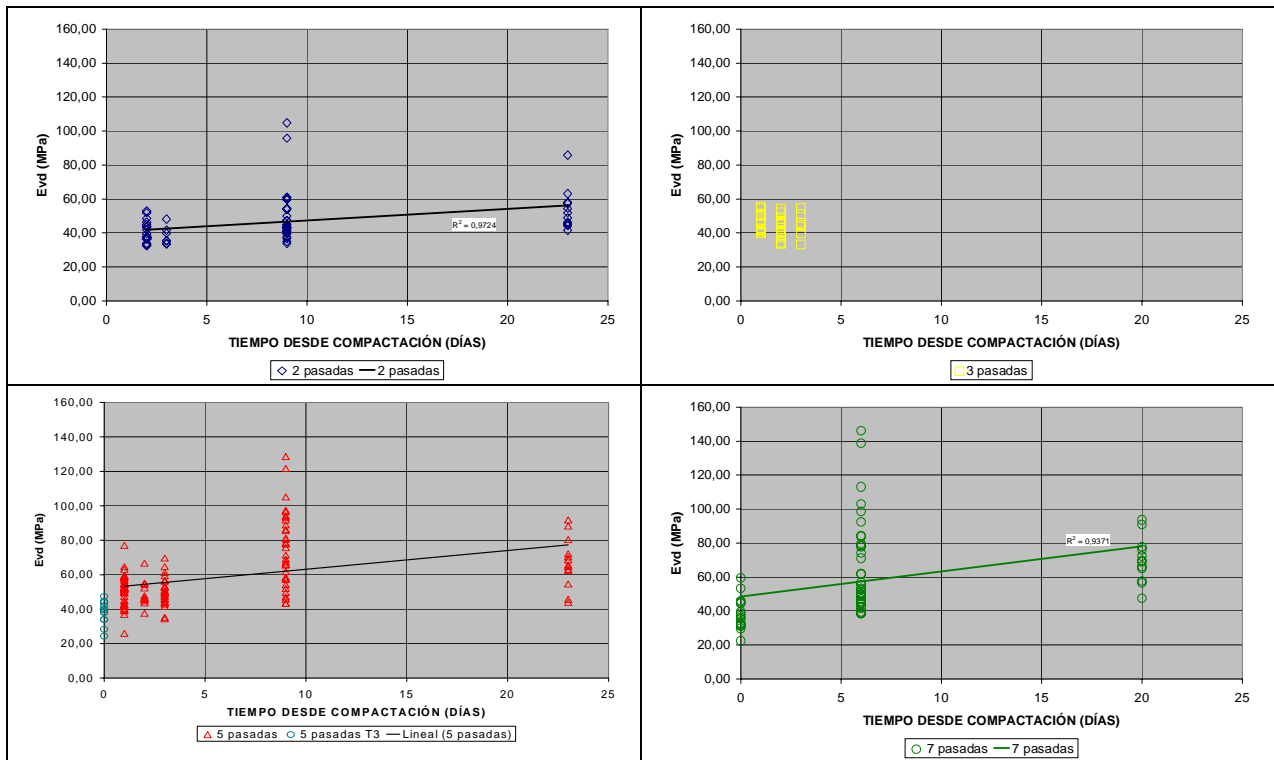


Figura 9. Módulo E_{vd} en función del tiempo desde la compactación y el número de pasadas del compactador

3.6 Ensayo dinámico de carga con placa de 600 mm.

Como resumen de los datos recabados con la dinaplaca se puede indicar:

- La dinaplaca no permite distinguir la evolución de la compactación según ésta se produce. En los ensayos realizados en el tramo 5+470 a 5+560 el valor del módulo medido por el equipo no aumentaba al aumentar el número de pasadas, de forma semejante a lo ocurrido con la placa alemana. De los cuatro puntos estudiados sólo en uno el valor del módulo aumentó, en el resto el valor del módulo fue menor tras 5 pasadas. Tras estudiar el módulo E_{d2} correspondiente al segundo ciclo de carga

tampoco se apreció que presentase un aumento con el número de pasadas.

- Los valores del módulo medido por la dinaplaca experimentan una mejora en el tiempo que parece ser mayor en las zonas mejor compactadas. Este fenómeno podría permitir diferenciar entre zonas con distinta compactación si los ensayos se realizan en un tiempo de al menos 20 días. En cualquier caso este límite debería ser confirmado y validado con más experimentación pudiendo localizarse en el entorno de los $E_{d3}=130$ MPa según los datos provenientes de esta campaña. Ver figura 10.

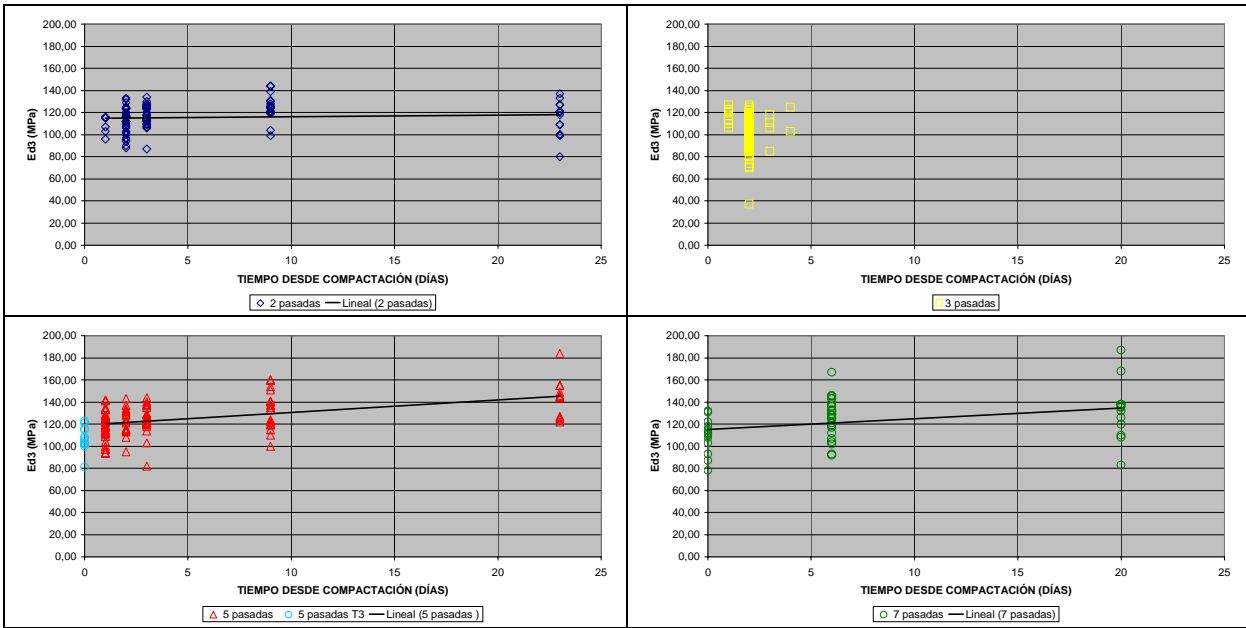


Figura 10. Módulo E_{d3} en función del tiempo desde la compactación y el número de pasadas del compactador

3.7 Ensayo con el Geogauge.

Respecto a este equipo puede concluirse que:

- Los valores en el módulo medido con el geogauge evolucionan tras realizar la compactación, mejorando en principio en las zonas mejor compactadas, ver figura 11. Este aspecto debe estudiarse con mayor detalle debido a que en algunas de las zonas compactadas con 5 pasadas esta mejora no se produjo.
- Si bien las medidas realizadas sobre eje de vías transcurridos unos 9 días tras la compactación

parecen indicar que podría marcarse una zona de aceptación de la compactación en el entorno de 120 MPa, existen resultados que aconsejan un mayor estudio. Nos referimos a las medidas puntuales sobre el eje de vía derecho que no cumplen el criterio a 6 seis días, a la gran dispersión en las medidas y la existencia de valores del módulo altas para alineaciones en teoría con peor compactación en los bordes. Por tanto se recomienda un estudio más profundo de estos aspectos antes de determinar un criterio de aceptación para la capa de subbalasto.

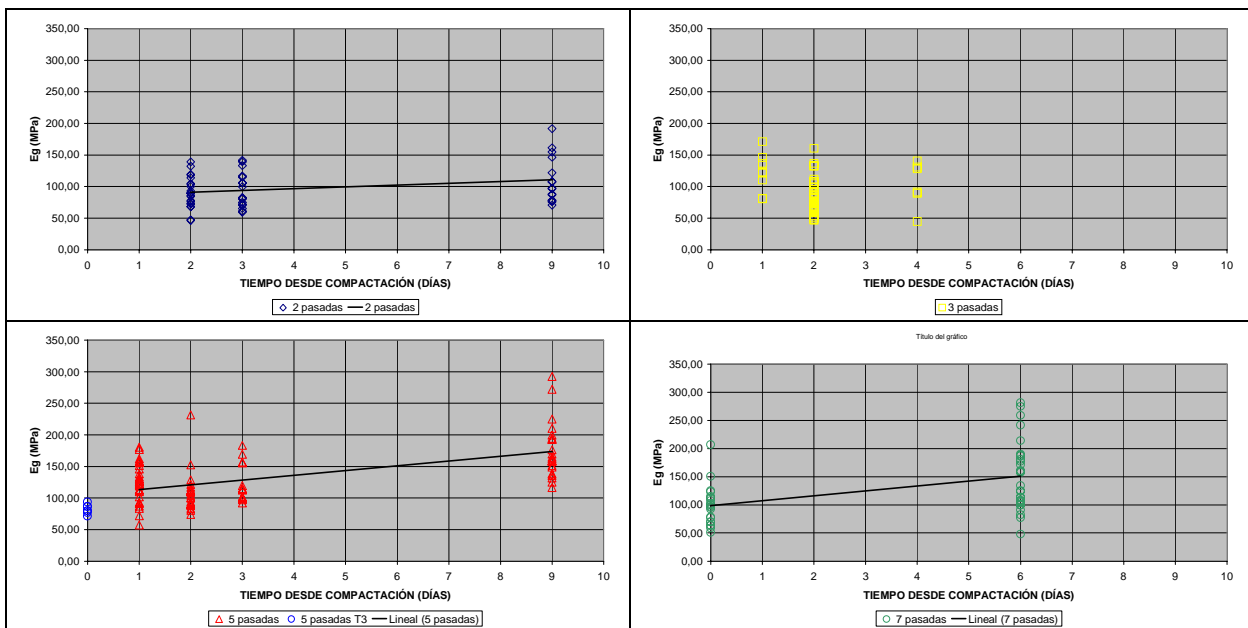


Figura 11. Módulo E_g en función del tiempo desde la compactación y el número de pasadas del compactador

3.8 Ensayo con el penetrómetro dinámico Panda.

Como conclusiones del estudio llevado a cabo con el penetrómetro Panda se pueden enumerar las siguientes:

- Debido a las características de la salida de datos que proporciona el equipo es necesario realizar un post-proceso de la información obtenida en campo similar a la realizada para el estudio, consistente en considerar la media de la resistencia obtenida entre los 10 y 25 cm de profundidad de la capa de subbalasto (despreciando los 5 cm superiores e inferiores de la capa). Este post-proceso se podría automatizar de forma sencilla.
- Se aprecia un aumento de la resistencia a la penetración según aumenta el tiempo de realización del ensayo respecto a la fecha de compactación. Este efecto es más acusado cuanto mayor es la compactación conseguida en el tramo. Ver figura 12.

- Se han señalado dos límites que parecen separar los tramos compactados deficientemente (con 2 y 3 pasadas dobles de compactador) de los tramos mejor compactados (con 5 y 7 pasadas dobles de compactador). Se han fijado dos límites para distintos plazos desde la compactación para considerar el efecto tiempo. Estos límites son 25 MPa para ensayos realizados hasta 3 días desde la compactación y 35 MPa para ensayos realizados al menos a 9 días desde la compactación.
- Un aumento en el grado de humedad a la hora de ejecutar los ensayos, provocado por un riego sobre la zona, no parece afectar al valor obtenido por el equipo.
- De cara a la operatividad del equipo para hacer un número elevado de medidas sería interesante una disposición sobre vehículo.

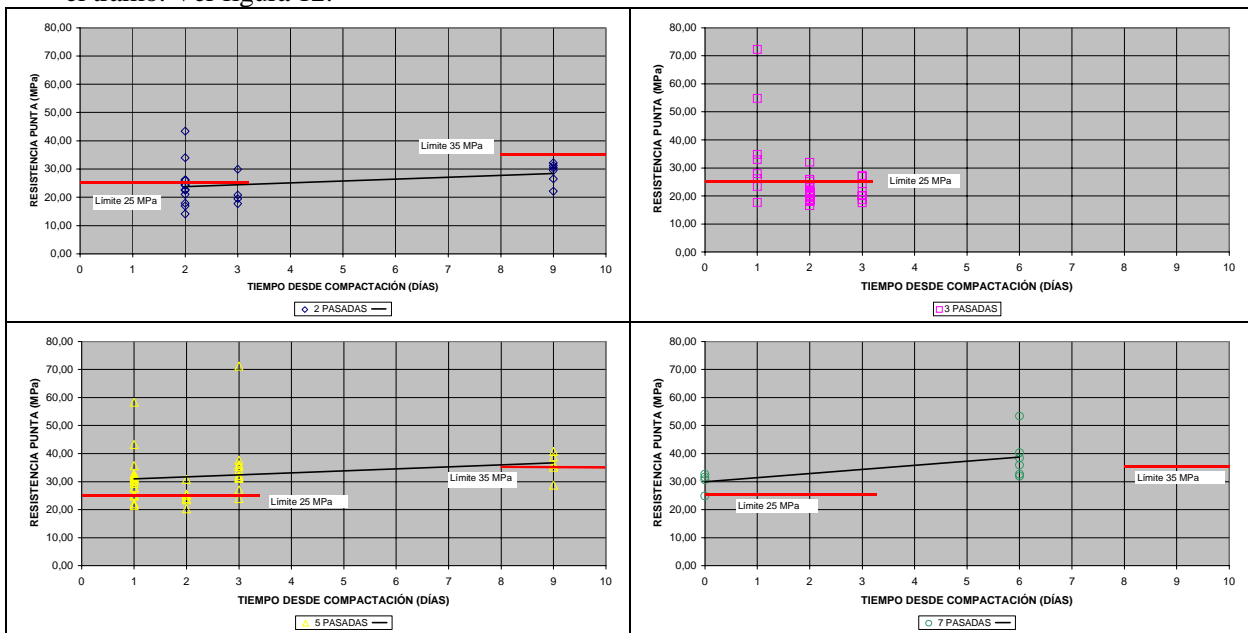


Figura 12. Resistencia a la penetración en función del tiempo desde la compactación y el número de pasadas del compactador

4 CONCLUSIONES

En los puntos siguientes se recogen las conclusiones principales del estudio realizado.

Los ensayos de control de compactación deberían efectuarse bajo eje de vías y no sobre el eje o los bordes de la plataforma. En los bordes de plataforma la compactación no es representativa por las características propias de borde de esas zonas, mientras que en el eje de la plataforma la limitesa

necesaria para facilitar el bombeo de la sección provoca una zona singular, no representativa del comportamiento del subbalasto bajo las vías.

En futuras zonas de ensayo sería conveniente efectuar las medidas según alineaciones ya que permiten conseguir un elevado rendimiento de los equipos de medida de cara a la caracterización estadística de las zonas.

Los ensayos realizados (con excepción de las medidas de densidad) señalan la importancia del plazo

transcurrido desde la compactación hasta la ejecución del ensayo en el valor del parámetro obtenido. Esto justificaría la definición en el pliego de condiciones de un tiempo desde compactación junto con la definición de los valores límite de cada ensayo.

Se ha apreciado que la evolución de los parámetros registrados con el tiempo es mayor en los tramos de mayor compactación.

Los trabajos realizados indicarían que alguna de las técnicas propuestas es más sensible al grado de compactación que el control mediante placa de carga estática recogido actualmente en los pliegos de condiciones.

La experiencia adquirida en los trabajos realizados ha permitido fijar unos valores de aceptación para cada equipo (valores obtenidos y plazos desde compactación). Estos valores separarían zonas de compactación adecuada respecto de zonas de compactación deficiente para los distintos equipos estudiados.

No todos los equipos permiten diferenciar tramos con distinto grado de compactación justo después de la compactación o a los pocos días de ésta.

En la actualidad se están efectuando ensayos de laboratorio sobre muestras de subbalasto procedentes de la zona estudiada para intentar reproducir y explicar alguno de los comportamientos observados en los que el tiempo transcurrido desde la compactación ha tenido una importante repercusión.

Las conclusiones recogidas en los puntos anteriores son el resultado de la experimentación en un único emplazamiento, que si bien ha sido exhaustiva, debería complementarse de cara a su generalización.

AGRADECIMENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda facilitada por Arturo Pastor García, Director de obra de INECO y a la empresa constructora COPASA adjudicataria del tramo que ha permitido la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- Abu-Farsakh M., Alshibli K.A., Nazzal M., Seyman E. *Evaluating the Stiffness Modulus of Highways Materials from the Geogauge Device*. Geotechnical Practice Publication. 2004.
- ADIF. *Pliego de Prescripciones Técnicas para los proyectos de plataforma (PGP-2006 y PGP-2008)*.
- Alshibli K.A., Abu-Farsakh M., Seyman E. *Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools*. Journal of materials in civil engineering. ASCE 2005.
- Briaud J.L., Seo J. *Intelligent Compaction: Overview and Research Needs*. Texas A&M University. 2003.
- Cabrita E.M. *Renovacao de plataformas ferroviarias: Estudos relativos a capacidade de carga*. A thesis submitted to the Do Porto University. 2005
- De Hita J., Sánchez F. *Utilización de la placa de carga dinámica para la recepción de explanadas*. Euroconsult. 2004.
- Fleming P., Frost M., Lambert J. *A Review of the Lightweight Deflectometer (LWD) Routine In Situ Assessment of Pavement Material Stiffness*. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. 2007.
- Ministerio de Fomento. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de materiales ferroviarios (PF)*, recogido en la Orden FOM 1269/2006.
- Morel G., Quibel A. *The Portancemetre: a new continuous control apparatus for capping layers and subgrades*. 1998.
- NGT 39. *Guideline to Using the Lightweight Drop-Weight Tester in Railway Construction*. Deutsche Bahn.
- Peterson D.L., Siekmeier J., Nelson C.R., and Peterson R.L. *Intelligent Soil Compaction Technology, Results and Roadmap toward Widespread Use*. presented at the 85th Transportation Research Board meeting, National Research Council, CD-ROM, Washington DC, USA, 2006.
- Saldaña F., Crespo R., Fernández C. *Comparación entre ensayos de carga con placa y ensayos con deflectómetro de impacto portátil*. 2004.
- Seyman E. *Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools*. A thesis submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University. 2003.
- TP BF-StB Part B 8.3. *Dynamic plate pressure test with the help of the light drop weight device*. FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen).
- ZTVA-StB 97. *Supplementary Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines for Excavations and Digging-up in Traffic Areas*. FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen)
- ZTV-StB LAS ST 96. *Pavement. Sub-bases*. Land of Saxony-Anhalt.