

# Análisis de las propiedades del *sub-balasto*: contradicciones y procesos que afectan a su función

La normativa que regula el sub-balasto a través del *Pliego de Prescripciones Técnicas PF-7* de ADIF, expone una serie de propiedades que debe cumplir y que entran en clara controversia, no existiendo actualmente una solución adecuada y definida. En este artículo se comentan algunas de especial relevancia y se plantean unas líneas de actuación para su investigación y solución. Especialmente, propiedades como la resistencia y la permeabilidad, difícilmente compatibles en los requisitos marcados, generan dudas sobre la compactación del sub-balasto y los métodos para su comprobación. También la granulometría exigida, se cuestiona al condicionar parámetros geomecánicos tan fundamentales como puede ser la rigidez vertical de la vía.

El *sub-balasto* es un árido que forma parte de la estructura total de asiento de las líneas férreas, y su especial relevancia en las vías de alta velocidad es debida a su capacidad para absorber las tensiones procedentes del balasto y diferirlas de forma homogénea a la plataforma de apoyo.

El interés en su estudio debe considerarse prioritario, si tenemos en cuenta que las elevadas sobrecargas dinámicas generadas por trenes con velocidades próximas a los 350 km/h, son la causa de importantes desgastes de elementos de la vía y del balasto que la soporta.

La mejora en las rocas que van a ser *sub-balasto*, debe estar tanto desde el lado de las propiedades geológicas y geomecánicas de los materiales, como de su dimensionamiento, para poder alargar los períodos de vida de la superestructura de asiento al mejorar su capa-

**Palabras clave:** ALTA VELOCIDAD, CARGA DINÁMICA, COMPACTACIÓN, PERMEABILIDAD, RESISTENCIA, SUB-BALASTO.



**Carlos PANADERO, Geólogo**  
**José L. SANZ CONTRERAS, Dr. Ing. de Minas**  
**U.P. MADRID – AEPA Castilla La Mancha**

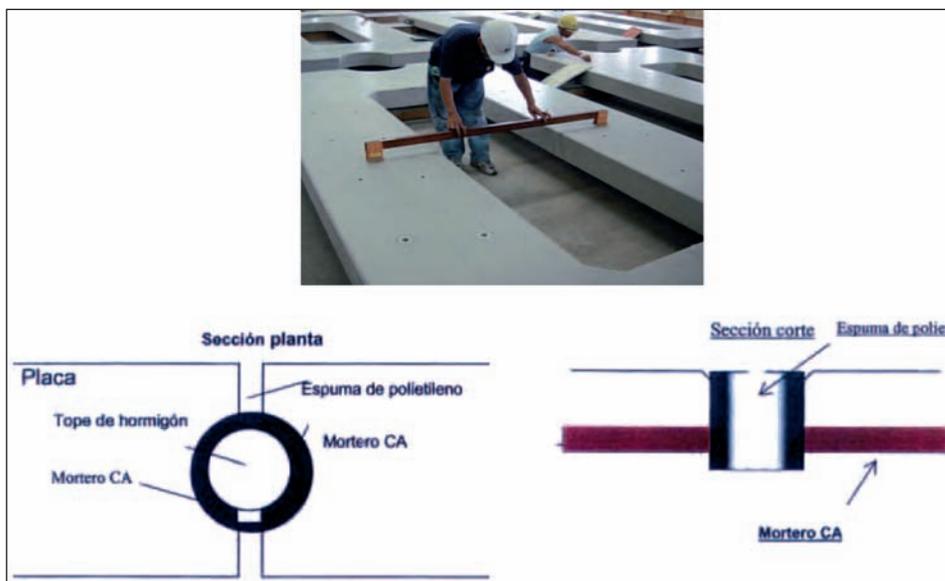
portante y disminuir los costes de mantenimiento.

## Modelos constructivos de vías

Actualmente existen dos modelos constructivos de vías para alta velocidad: las vías en placa, aceptadas y desarrolladas por Japón y por Alemania en los últimos tiempos, y las vías en balasto, de las cuales, España, Francia e Italia son las máximas representantes. Pero ambos

sistemas tienen en común que basan gran parte de su efectividad en la interposición de una capa de áridos entre la infraestructura y la superestructura, que absorbe las cargas de los trenes y mejora la rigidez del conjunto. Esta capa de áridos es el *sub-balasto* para el sistema de vía en balasto y el nivel de amortiguación de mortero de cemento-betún asfáltico en la solución en placa.

La *vía en placa* (**Fig. 1**) consta esencialmente de una superestructura de placas prefabricadas de hormigón, que mediante sujeciones del tipo grapa fijan los carriles. Estas, se apoyan sobre una solera de hormigón mediante una almohadilla intermedia de un mortero de cemento-betún asfáltico. Esta almohadilla tiene la función de absorber las variaciones de cargas ligadas al tráfico de los trenes, y mitigar las vibraciones, es decir, conferir la elasticidad



[Figura 1].- Detalle de la elaboración de las Placas de Hormigón. En las secciones en planta y corte se aprecia cómo las placas se unen mediante un cilindro rodeado de mortero de cemento-betún (CA) que también se coloca en la base de las mismas para controlar la rigidez del sistema y la transmisión de cargas a la plataforma.

(rigidez) necesaria al conjunto para reducir el desgaste de los elementos de la vía y mejorar la rodadura para lograr un mayor confort en el transporte.

Este modelo se fundamenta en crear una estructura muy rígida que se coloca en la superestructura, que no debe tener asientos superiores a 30 mm en la plataforma, limitando para ello la altura de los terraplenes y condicionando la pendiente de la traza, que en general, va a requerir un predominio de largos túneles y viaductos.

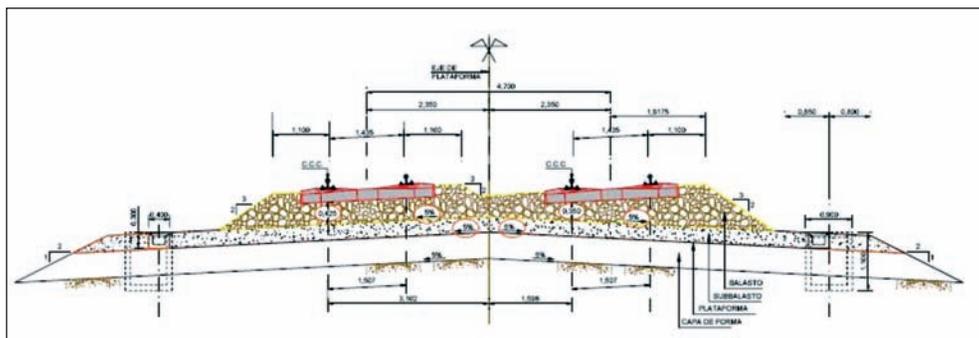
La vía en balasto (Fig. 2) se proyecta sobre plataformas de tierras, tanto en desmante como en terraplenes, en las que apoya la superestructura constituida por la capa de asiento (formada por el sub-balasto-balasto) que a su vez da soporte a los elementos de vía (traviesas y vías). En este modelo, la respuesta de la vía la proporciona el sistema balasto-plataforma siendo el sub-balasto un elemento destacado al asumir la responsabilidad de absorber las cargas de la vía y repartir las deformaciones de manera homogénea sobre la plataforma. Por tanto, actúa de forma similar a la capa de mortero-betún asfáltico de la vía en placa. En este modelo, en general, la altura de los terraplenes puede llegar a ser considerable, disminuye el número de viaductos y se reduce sensiblemente la longitud de los túneles.

## Principales propiedades

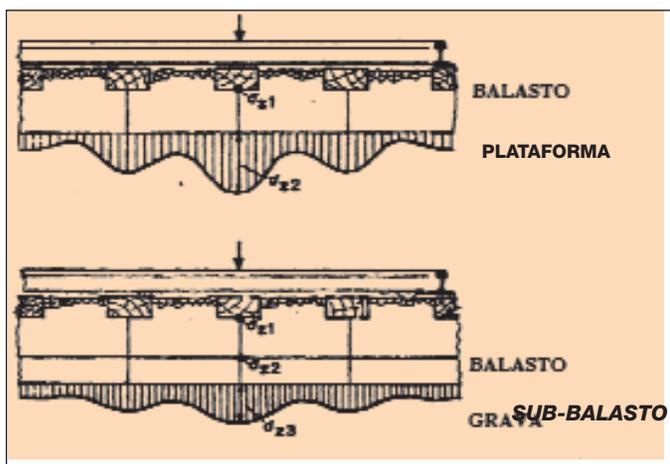
Los materiales granulares (áridos) que conforman el sub-balasto vienen siendo objeto de un interés creciente desde que diversos autores (Prud'Home, 1970; Eisenmann, 1974, López Pita, 1976) vieron las ventajas de incluir un nivel intermedio de transición entre infraestructura y superestructura (Fig. 3) que influía positivamente en la mejora y optimización de las líneas en balasto, por su capacidad para absorber las cargas transmitidas desde la vía, repartiendo las deformaciones sobre la plataforma de manera uniforme. También, se obtenía un mejor drenaje de las aguas procedentes de la capa de balasto y se evitaban procesos capilares desde la plataforma hacia el balasto.

El sub-balasto está constituido por un árido del tipo grava arenosa bien graduado, con un pequeño porcentaje de finos. La procedencia de este árido es de cantera, desmontes o préstamos de materiales rocosos, que son tratados mediante machaqueo, cribado y clasificación (Fig. 4). También puede proceder de la reutilización de materiales de naturaleza rocosa de obras civiles. Esta definición se recoge en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF) en el apartado dedicado al Sub-balasto.

El correcto conocimiento de las propiedades de estos áridos permite establecer una distribución adecuada de los tamaños y pre-



[Figura 2].- Corte típico de una vía en Balasto. Se aprecian las partes que constituyen la capa de asiento: balasto-sub-balasto y capa de forma (perteneciente ya a la Plataforma). La colocación de estos materiales se realiza según una pendiente a dos aguas que coincide con el eje de la plataforma y que no debe ser inferior al 3 %.



[Figura 3].- Influencia del Sub-balasto en la homogeneización de tensiones sobre la plataforma, actuando como una losa de cimentación. Eisenmann, 1974.

decir, en la medida de lo posible, su comportamiento futuro. Las propiedades más importantes de los áridos para sub-balasto están regladas por normas UNE de ensayo de laboratorio, recogidas en el mencionado Pliego PF-7. Fundamentalmente tres de estas propiedades están íntimamente relacionadas:

- Granulometría. → Permeabilidad
- Resistencia al desgaste-fragmentación

Dada su posición en la estructura total, al ser materiales granulares de transición entre el balasto y la capa de forma de la plataforma, el sub-balasto debe tener propiedades comunes

con ambos y otras muy específicas que lo hacen especial por la misión a cumplir. .

Así, por ejemplo, el sub-balasto debe homogeneizar y minorar las tensiones que le llegan del balasto para que la plataforma se vea poco afectada, por tanto, debe tener un módulo de deformación elástico y un coeficiente de balasto muy altos.

Se le exigen unas condiciones de permeabilidad que faciliten el drenaje de los lixiviados del balasto hacia canaletas laterales que los alejen de la plataforma, y también, debe impedir la generación de sobrepresiones intersticiales que se pueden dar si el contenido de finos



[Figura 4].- Aspecto del sub-balasto en una zona de acopio. Su granulometría y definición bajo la Gráfica de Casagrande coincide con el de una grava arenosa bien graduada. Recogida de muestras para los análisis preceptivos en laboratorio.

es demasiado alto. Estas sobrepresiones, podrían aumentar por las cargas intermitentes, producidas por el paso de los trenes, ocasionando la rotura de las partículas del sub-balasto, con la consiguiente deformación no admisible del resto de los elementos de asiento: balasto y capa de forma.

## Granulometría del sub-balasto: influencia en la permeabilidad

A los materiales granulares que van a constituir el *sub-balasto* se les pide que sean un material con una granulometría dentro de un huso específico, para conseguir una estructura lo más compacta posible, que permita alcanzar una densidad seca elevada y por tanto, poco deformable. Las partículas serán muy resistentes, con una forma principalmente angulosa para crear una estructura de *encaje* y así conseguir un nivel con buena estabilidad dimensional.

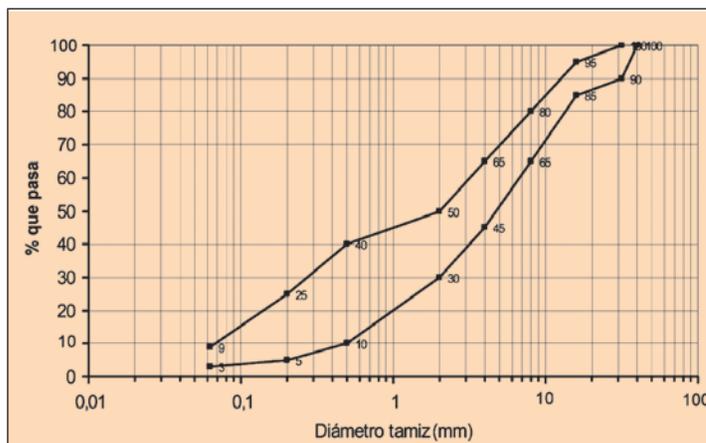
Además las partículas deben ser no evolutivas, es decir permanecer inalterables ante el paso del tiempo, resistiendo las variaciones medioambientales e indeformables ante tensiones inducidas por cargas puntuales y cargas dinámicas, proporcionales a la velocidad, que aparecen al paso de los trenes y físicamente comparables al efecto de martilleo.

El 100 % de las partículas de tamaño grava (que quedan retenidas en el tamiz 4) deben ser de machaqueo sin sobrepasar los 40 mm el tamaño máximo; debe contener más del 30 % de arena, y finos hasta un 9 %, los cuales, es indispensable que no sean plásticos por lo que su equivalente de arena será mayor de 45 (para la fracción que pasa por el tamiz 2), **Fig. 5**.

El empleo de árido triturado requiere la adición de arena natural, en la proporción conveniente marcada por el *huso granulométrico*, para:

- Obtener una menor heterogeneidad de la mezcla.
- Facilitar su puesta en obra haciéndola manejable.
- Aumentar la densidad.
- Evitar la formación de bolsas, o segregación de tamaños, que se producirían si se utilizaran conjuntamente arenas y gravas.

Además se exige unas limitaciones a los coeficientes de uniformidad y de curvatura que buscan reducir el índice de huecos del conjunto. Con estas restricciones a la granulometría se consigue en teoría un material compactable en tongadas de 20-25 cm y relativamente impermeable a las aguas que le lleguen procedentes del balasto y suficientemente permeable a las aguas ascensionales por capilaridad de la plataforma.



[Figura 5].- Huso granulométrico del sub-balasto según especificaciones marcadas en la Orden FOM/1269/2006.

Directamente relacionada con la granulometría va a estar, pues, la permeabilidad. Esta propiedad no es una cualidad, sino más bien un defecto, ya que permite que el agua pase, con más o menos facilidad, al interior de la roca o del suelo dependiendo de los huecos que tengan éstos. Un material granular como el sub-balasto con partículas de tamaños determinados va a tener también unos huecos entre partículas que facilitarán la circulación del agua. El coeficiente de permeabilidad *k*, es el parámetro que mide la *facilidad de circulación del agua*.

La *permeabilidad* dependerá por tanto de:

- La granulometría, es decir, de la distribución de tamaños de las partículas, siendo *k* menor, cuanto más pequeñas sean las partículas.
- La densidad, habida cuenta que, para una misma granulometría, cuanto mayor sea la densidad, menor será el volumen de huecos, y menor será también *k*.
- La forma y orientación de las partículas.

Para el *sub-balasto*, con la granulometría exigida, se le pide que tenga un valor *k* de  $10^{-6} \text{ m/s} = 10^{-4} \text{ cm/s}$ .

## Recursos geológicos como fuente para obtener un sub-balasto resistente

El *sub-balasto* debe estar integrado por áridos muy resistentes. La resistencia debe hacer frente a mecanismos y procesos tan variados como: la rotura a compresión simple, el desgaste por fricción e impacto, a los efectos de la temperatura (heladicidad) y la composición de las aguas, al medio ambiente en sus diversas influencias, etc.

Estas condiciones de partida permiten marcar una orientación geológica hacia determinadas rocas que cumplen en gran medida estas necesidades y que la petrología, como rama de la geología, ha estudiado y catalogado, identificando composiciones y porcentajes de minerales que integran cada tipo de roca, es-

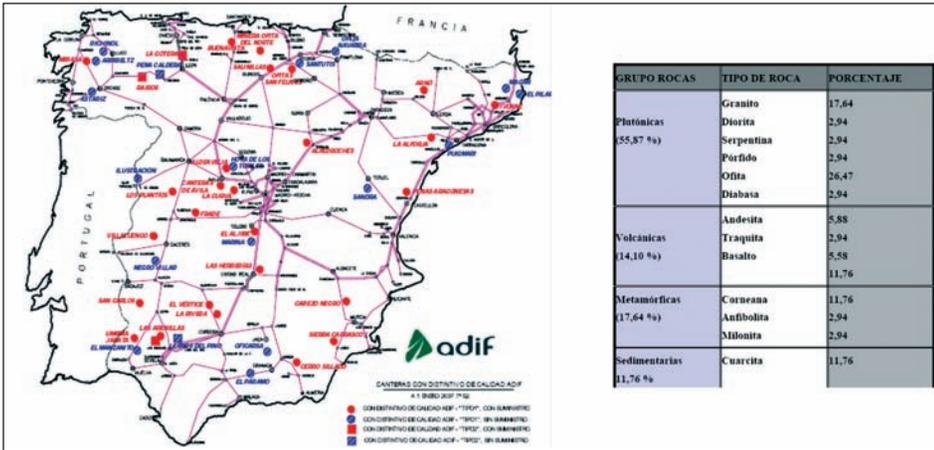
tableciendo ambientes de génesis que las sitúan en yacimientos muy concretos y analizando su naturaleza a través de sus propiedades físico-químicas que les confieren entre otras cualidades, su resistencia ante esfuerzos de distintas magnitudes.

Hay que recordar que en los procesos tectónicos están implicadas presiones y temperaturas muy superiores a los de cualquier actividad humana, por lo que determinados ambientes geológicos han dado lugar a la formación de agregados minerales (rocas) muy resistentes a determinados parámetros. Partiendo de este conocimiento previo de los ambientes geológicos más idóneos, es fácil buscar aquellos sitios o lugares de los cuales extraer las rocas más apropiadas.

Respecto a la naturaleza petrológica de las rocas que pueden ser *sub-balasto*, hay que decir, que las rocas más apreciadas para su utilización son las silíceas, de grano fino y tendencia a ser granulares. Se encuentran en todos los grandes grupos de rocas: de origen metamórfico (anfíbolita, algunos tipos de milonitas, cuarcita y corneana), ígneo (basalto, triqueta, granitos con mucho cuarzo y grano fino y peridotita) y filonianas (ofitas), **Fig. 6**.

Estas rocas, se caracterizan por su alta resistencia y baja alterabilidad cuantificadas en el Pliego del ADIF por los ensayos de: *Los Ángeles (D.L.A)* y *Microdeval*, que aunque no son propiamente ensayos de esos parámetros, si proporcionan unos índices relacionados con el comportamiento del material. En la homologación o validación de canteras, el dato que se utiliza predominantemente es el *D.L.A*.

En España, ADIF controla los puntos de producción de áridos para balasto y sub-balasto estableciendo un *Distintivo de Calidad* que otorga a las canteras que superan un procedimiento que engloba tanto la calidad geotécnica de la masa canterable, los frentes de explotación y la planta de tratamiento. El certificado del *Distintivo de Calidad ADIF* tiene una vigencia de cinco años, por lo que se debe actualizar con carácter quinquenal (ver Fig. 6).



[Figura 6].- Canteras con Distintivo de Calidad ADIF para suministro de balasto y sub-balasto. Rocas empleadas para balasto y sub-balasto.

## Análisis de las propiedades contradictorias del sub-balasto y procesos que interfieren en la efectividad de su función

Las propiedades a cumplir, se encuentran reguladas mediante ensayos normalizados que controlan desde su yacimiento geológico, hasta su puesta en obra, y debe hacerse dentro de unos intervalos de valores en los cuales surgen las controversias.

Al *sub-balasto* se le exige alta resistencia, alta rigidez, capacidad portante y que sea suficientemente impermeable, todo ello a partir de un material con una granulometría y naturaleza muy concretas, y obtenido mediante proceso de compactación, que será el proceso clave del resultado final.

### - Resistencia y permeabilidad del subbalasto

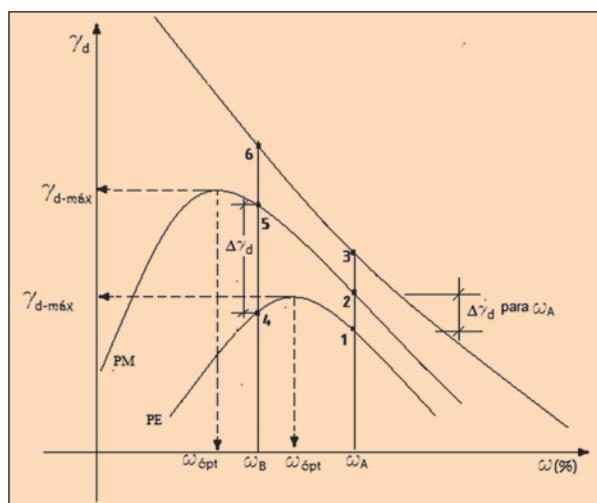
La puesta en obra del sub-balasto significa que se parte de un material que ha cumplido con lo especificado en el *Pliego PF-7*. Considerando un material con un huso granulométrico adecuado, de tipo grava arenosa, se debe compactar hasta como mínimo del 100 % del valor de densidad seca y humedad óptimos dados por el ensayo *Próctor Modificado* realizado sobre muestra representativa del material a utilizar, que será el ensayo de referencia para este proceso.

La compactación del sub-balasto es un proceso de estabilización mecánica que implica un mejoramiento del nivel de actuación, sin modificación química de sus compuestos. Se consigue la reducción del índice de poros con lo cual se incrementa el peso específico seco. A diferencia de la consolidación, que es un proceso natural a escala geológica, que consigue la completa expulsión del agua y el aire ocluido en el suelo, la compactación del sub-balasto que

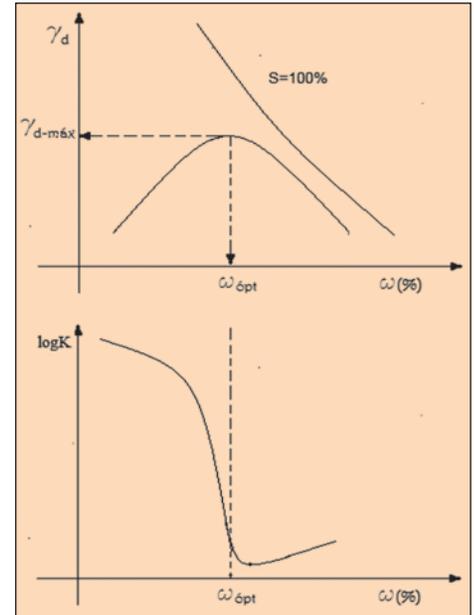
contiene finos, aunque no supere el 9 %, no logra la saturación y menos aún la expulsión del agua de los poros.

La *Fig. 7* superpone las gráficas de los dos tipos de ensayo *Próctor*: estándar (*P.E*) y modificado (*P.M*). Cada uno es una sucesión de valores de densidad seca obtenidos para una misma energía de compactación variando el contenido de humedad del suelo. Para cada densidad seca máxima existe una humedad óptima. Rebasar esta humedad supone que parte de la energía de compactación se va hacia el agua y dispersa la resistencia, especialmente al corte, del sub-balasto. El *P.M* implica una energía mayor y revela cómo se pueden conseguir densidades secas mayores para menores contenidos de humedad: es decir, es una forma más efectiva de pasar de un suelo disgregado, a un suelo con una estructura más compacta y por tanto resistente, algo similar al proceso diagenético de transformación de un suelo en una roca..

Dicha gráfica también revela y justifica cómo un suelo con humedad baja debe ser



[Figura 7].- Gráfica de ensayo Proctor: estándar (*P.E*) y modificado (*P.M*).



[Figura 8].- Gráfica de humedad.

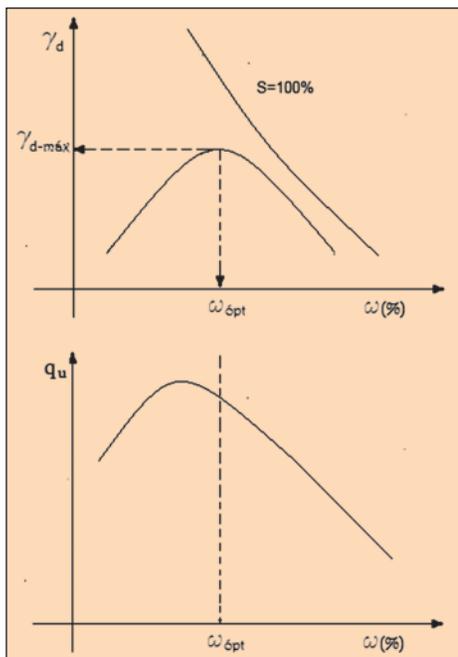
compactado con energías altas similares a la del *P.M* aunque suponga un mayor coste económico pues se consigue mejorar las propiedades mecánicas del *sub-balasto*: resistencia a la compresión y al corte, permeabilidad y flexibilidad. Estas propiedades son las que se requieren a los áridos para ser *sub-balasto*.

No obstante, la resistencia y la permeabilidad son dos propiedades que discurren por pendientes diferentes cuando se compacta a los valores del *P.M*.

En la *Fig. 8* se refleja cómo la humedad óptima para la que se consigue un peso específico seco óptimo es menor que la que se debería tener para que la compactación consiga una estructura menos permeable. La permeabilidad más baja se consigue cuando compactamos con humedades 2-3% superiores a la óptima lo cual se suele traducir en mejoras del orden de 100 cm/s en *k* (permeabilidad). Por el contrario, actuar de esta manera penaliza la densidad seca, dando un nivel menos compacto, donde el agua retenida puede generar sobrepresiones e inducir efectos perniciosos sobre el *sub-balasto*.

Esta controversia se magnifica si comparamos las curvas de resistencia con la del ensayo *Próctor*: la mayor resistencia para una energía de compactación aplicada, se obtiene para un valor de humedad 2-3% inferior a la óptima para dicha energía. Además, la resistencia disminuye bruscamente cuando se compacta con humedades superiores a la óptima (*Fig. 9*).

Este fenómeno demuestra que, de forma natural no es posible conseguir un *sub-balasto* muy resistente y sufi-



[Figura 9].- Comparación de curvas de resistencia y de ensayo Próctor.

cientemente impermeable puesto que el aumento de resistencia sitúa al *sub-balasto* en valores porcentuales de humedad, en torno al 6 % inferiores a los requeridos para disminuir significativamente la permeabilidad del material.

El límite que marca el *PF-7* para el índice *k* del *sub-balasto* es de  $10^{-6}$  m/s =  $10^{-4}$  cm/s, típico de arenas limpias y/o mezcla de gravas y arenas como es el caso. Caracteriza una permeabilidad media y un buen drenaje de las aguas que le lleguen.

Según la expresión de *Hazen* empleada para estimar la permeabilidad en materiales granulares la relación entre granulometría y permeabilidad viene dada por:

$$k \text{ (cm/s)} \approx 100 (D_{10})^2$$

( $D_{10}$  hace referencia al tamaño de tamiz que deja pasar el 10% de la muestra).

Esta expresión está bastante sancionada por la práctica y demuestra que para el huso granulométrico prescrito para el *sub-balasto* se obtienen valores teóricos de permeabilidad superiores a  $10^{-4}$  cm/s, incluso aunque se considere que los elementos gruesos (mayores de 5 mm) no influyen en la permeabilidad. Para conseguir la permeabilidad establecida en Pliego, sería necesario que la curva granulométrica del *sub-balasto* esté desplazada hacia el límite superior del huso en la zona de finos.

Por otra parte, un mayor contenido en finos puede suponer la génesis de subpresiones intersticiales y una disminución significativa de la resistencia al corte del *sub-balasto*, penalizando su finalidad como capa disipadora de los esfuerzos transmitidos por el balasto.

Esta contrariedad entre dos características fundamentales que se le exige al *sub-balasto* implica que debe considerarse tomar algún tipo de medida, especialmente en el sentido de la permeabilidad, ya que, está claro que la resistencia es la propiedad principal que debe prevalecer (Figs. 10-11). En este sentido países como Japón e Italia han estudiado las ventajas que presenta utilizar capas bituminosas de 5-12 cm de espesor separando el balasto del *sub-balasto*. En España, se viene recomendando realizar riegos bituminosos de esta capa para conseguir compatibilizar resistencia con permeabilidad (Arcones Torrejón, 2009).

También puede considerarse, la posibilidad de dar cierta estabilización al *sub-balasto* mediante una mezcla con cemento y polímeros que actúan sin llegar a ser un ligante ni un reactivo que modifique las propiedades químicas, con buenos resultados en subbases empleadas en carreteras y pistas aeroportuarias en Francia y Sudamérica.

### - Compactación del sub-balasto en obra

La correcta compactación de la capa de *sub-balasto* es fundamental para que ésta tenga la resistencia a compresión y cortante necesaria para soportar las fuertes cargas puntuales,

además de adquirir la impermeabilidad suficiente para evitar las filtraciones hacia la plataforma. No obstante, no es lo mismo la compactación a escala de laboratorio que la que se realiza en obra, cuyo objetivo debe ser conseguir los valores proporcionados por el *P.M.* La principal diferencia radica en la energía de compactación suministrada en obra, que no puede ser cuantificada como se hace en laboratorio con la energía dinámica del *P.M.*, entre otras cosas, porque la energía que se aplica en campo es estática, por vibración y por amasado, o una combinación de estas y dependerá además de (Fig. 12):

- Tipo, peso y número de pasadas del equipo de compactación.
- Tipo de suelo.
- Espesor de la capa.

Sobre el material extendido en tongadas, nunca inferiores a 15 cm, se deben realizar ensayos de *Placa de Carga* según norma UNE estipulada en Pliego ADIF: un primer ciclo de carga (*Ev1*), una descarga y un segundo ciclo de carga (*Ev2*), utilizando una placa de 300 mm de diámetro (Fig. 13). Siguiendo este procedimiento se debe cumplir que:

$$Ev2 \geq 120 \text{ Mpa} // Ev2/Ev1 \leq 2,2$$



[Figura 10].- Capa de "carbonilla" interpuesta entre la plataforma y el balasto. De esta manera se conseguía en las antiguas líneas convencionales evitar las filtraciones a la plataforma.



[Figura 11].- Colocación de Geotextil de alto módulo de elasticidad sobre el que se vierte el *sub-balasto* para su posterior compactación. A parte de impermeabilizar el contacto del *sub-balasto* con la plataforma, facilitando el drenaje hacia las canaletas exteriores, este material tiene alta resistencia al punzonamiento por lo que mejora el comportamiento del *sub-balasto* ante posibles asentamientos de la capa de formador.



[Figura 12].- Equipo de compactación normal utilizado para acabado de capas de asiento: capa de forma y sub-balasto.



[Figura 14].- Control de la compactación del sub-balasto mediante medidas nucleares de la densidad seca y humedad.



[Figura 13].- Ensayo de Placa Estática (izquierda) y Dinámica (derecha) del sub-balasto. Actualmente ambos ensayos son correlacionables permitiendo el segundo mayor operatividad al no necesitar de un peso de grandes dimensiones (camión) para aplicar la carga, aparte de ser más rápido de ejecución.

Los estudios con los que se cuenta actualmente, basados en comprobaciones y ensayos en campo son bastante limitados, restringidos a tramos concretos de determinadas líneas y no generalizados a toda la infraestructura de AVE, pero ponen de manifiesto serios problemas para conseguir que se cumpla esta condición, especialmente el segundo término. Trabajos realizados por el CEDEX, utilizando diversos métodos de comprobación de la compactación, revelan que el método recomendado en Pliego tiene mucha dispersión y no discrimina adecuadamente las zonas, incluso se dan situaciones, en las que los tramos con menos pasadas del compactador tienen módulos más altos que otros en los que se han dado hasta 7 pasadas.

Este ensayo parece estar muy condicionado por el tiempo transcurrido entre la compactación y la medida. Posibles explicaciones a los errores inducidos se pueden deber a varios motivos:

- Al contenido de humedad de la capa en el momento de realizar el ensayo. Aunque el Pliego no es muy estricto con la humedad si es cierto, como hemos señalado anteriormente, que valores del orden a 3 % por encima de la óptima pueden hacer disminuir bruscamente la resistencia del material. Las medidas realizadas varios días después pueden registrar

tratar módulos más altos por la simple pérdida de humedad. **Fig. 14.**

- Otro factor que afecta a estos ensayos de placa de carga (estática-dinámica) son las condiciones del material de apoyo del sub-balasto; el coeficiente de balasto de la subbase, y por tanto su módulo de deformación, puede variar ampliamente dependiendo de la calidad de la capa de forma sobre la que apoya. Los valores anómalos en capas de sub-balasto sometidas a varias pasadas de compactador pueden ser

reflejo de un mal acabado de la capa de forma. El módulo medido en una placa de carga no es exactamente el de la capa de sub-balasto: una placa de 300 mm ensayará hasta 0,9 m de profundidad por debajo de su superficie por lo que el valor de E que se obtiene está claramente influenciado por las condiciones del material que hay debajo del sub-balasto, si este tiene un espesor normal de 30-40 cm.

- Una granulometría poco adecuada puede hacer que el material no sea debidamente compactable.

En definitiva, el método de comprobación de la compactación debería ser evaluado más profundamente a fin de no crear incertidumbres en el acabado final de la capa de sub-balasto. La información con la que se cuenta, indica que los ensayos de placa de carga tanto estático como dinámico entran en esta categoría de incertidumbre. También hay que considerar la mayor operatividad del sistema puesto que hará potenciar métodos que tengan altos rendimientos y evalúen la capacidad portante de secciones lineales y no puntos dispersos (**Fig. 15**).



[Figura 15].- Los ensayos de penetración dinámica tipo DPSH pueden ser un buen ensayo para verificar el estado de compactación del material donde apoya el sub-balasto. Debido a la alta energía de este ensayo se puede obtener un perfil de golpeo de bastantes metros, en la vertical, de la plataforma. Cuanto mayor sea la compactación de la plataforma menos bajará este ensayo. Puede permitir evaluar la magnitud de los asientos postconstructivos en obras nuevas.

## Conclusiones y propuesta de líneas de investigación

A diferencia de otro tipo de construcciones, las vías ferroviarias, y especialmente las de Alta Velocidad, no permiten prácticamente deformaciones en el plano vertical porque los enormes esfuerzos en el punto de contacto entre rueda y carril, hacen que pequeñas deformaciones-deflexiones produzcan unos esfuerzos dinámicos tan elevados que afectan a la geometría de la vía y al desgaste de los materiales granulares, disparando en consecuencia, los costes de mantenimiento. Estas sobrecargas dinámicas se incrementan con la velocidad por lo que supondrán un serio problema si se quiere acercar cada vez más a la velocidad límite de 350 km/h previstos para este sistema de vía.

El *sub-balasto* debe estar constituido por áridos procedentes de materiales rocosos muy competentes, no evolutivos, para lo cual la petrología indica los mejores ambientes geológicos donde situar los centros de extracción y preparación.

La mejora del *sub-balasto* puede incidir activamente en el coste de mantenimiento de la construcción de líneas de Alta Velocidad. Para ello será necesario hacer una revisión de aquellas propiedades, especificadas en el *Pliego ADIF*, que son de difícil cumplimiento por entrar en clara contradicción.

Las controversias que aparecen deben someterse a un criterio técnico más riguroso que prime las propiedades más importantes y busque alternativas para mejorar aquellas que quedan penalizadas; esto puede obligar a realizar mejoras del *sub-balasto* mediante estabilizaciones con la adición de ciertos productos, dando lugar a una mezcla que cumpla los objetivos prescritos en *Pliego ADIF*. No debe descartarse el considerar la interposición de niveles de naturaleza asfáltica (bitúmenes), la colocación de geotextiles, etc.

El control riguroso de la compactación de los materiales es fundamental para conseguir estructuras muy resistentes y poco deformables, con altos módulos de deformación y coeficientes de balasto. El resultado de la compactación, el cumplimiento de los valores Próctor estipulados para el huso granulométrico del material utilizado en la construcción de la plataforma, y posteriormente en las capas de asiento, debe controlarse con métodos que garanticen rapidez y que puedan ensayar secciones longitudinales de la traza, y no zonas muy puntuales y con medios lentos.

Con la experiencia que se tiene actualmente de los problemas que afectan a líneas similares en países donde llevan en funcionamiento bastantes años líneas de velocidades altas, antes que en España, y la propia que se tiene de la primera línea Madrid-Sevilla, se podría

establecer un protocolo de estudio de anomalías y patologías, con el cual determinar el tipo de daño y la posible o posibles causas, para de esta forma investigar y proponer alternativas de solución.

## Bibliografía

- PANADERO GARCÍA. C. **Importancia del sub-balasto en la mejora de líneas de alta velocidad.** Septiembre 2010. Trabajos previos de la Tesis doctoral, dirigida por José Luis Sanz Contreras (UPM).
- RODRÍGUEZ MIRANDA. M. **Simposio sobre Terraplenes, Pedraplenes y otros.** Madrid. 1986. pp 219-245.
- ESTRADÉ. J. **La superestructura de vía sin balasto: perspectiva de su aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad.** Revista de Obras Públicas. Sept 1991. pp 9-28.
- MELIS MAYNAR. M. **Terraplenes y balasto en Alta Velocidad Ferroviaria.** Revista de Obras Públicas. Marzo 2006. pp 7-36.
- LÓPEZ PITA. A. **La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad.** Revista de Obras Públicas. Nov 2001. pp 7-26.
- **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios. PF-7.** 2006.
- FONSECA TEIXEIRA. P. **Vía sobre sub-balasto bituminoso como opción a tener en cuenta para futuras líneas de alta velocidad de España.** Jornadas Internacionales Nuevas tecnologías y técnicas constructivas en el sector ferroviario. Bilbao. Enero 2007.
- Arcones Torrejón. A. **L.A.V Madrid-Extremadura, tramo Montijo-Badajoz. Consideraciones sobre el sub-balasto.** Ingeniería del Suelo S.A. Agosto 2009.
- EISENMANN. J ET AL. **Superestructura de balasto para altas velocidades.** Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid. 1977.
- RUIZ CASAMAYOR. J., MONTEIRO VAZ. C., DELGADO TORRES. G., ESTACA GÓMEZ. M. **Caracterización de plataformas existentes para alta velocidad mediante ensayo de carga vertical con placa dinámica.**
- ACEVEDO CATÁ. J., ARMAS NOVOA. R., MORALES QUEVEDO. P. **Estabilización e Impermeabilización de Suelos.** CUJAE. Ciudad de la Habana, Cuba.
- SANTIAGO RECUERDA. E., GARCÍA DE LA OLIVA. J.L., GONZÁLEZ PANIAGUA. P. **Comparación de diferentes métodos de control de compactación del sub-balasto.** CEDEX. Realización de trabajos de investigación y desarrollo tecnológico de interés de ADIF y del CEDEX en el cuatrienio 2006-2009.
- BUSTILLO REVUELTA M., CALVO SORANDO J.P., FUEYO CASADO L. **Rocas Industriales: tipología, aplicaciones en la construcción y empresas del sector.** Editorial Rocas y Minerales. Madrid 2001.
- SUÁREZ ORDÓÑEZ. L.E., SEVILLANO ARRIBAS. N., CAPOTE. R. **Distintivo de Calidad ADIF de Canteras Suministradoras de Balasto. Área A.** □



### E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS

Dpto. Ingeniería Geológica

Alenza, 4

28003 Madrid

☎: 913 366 984

E-mail: [jose.luis.sanz@upm.es](mailto:jose.luis.sanz@upm.es)

Web: [www.upm.es](http://www.upm.es)