

Algunas notas sobre el comportamiento de las zahorras en los firmes

Manuel G. Romana⁺; Ignacio Pérez Pérez^{*}; Vicente Navarro Gámir^{*}

⁺ Universidad Politécnica de Madrid. E. T S. Ingenieros de Caminos. Dpto. de Ingeniería Civil. Transportes.

^{*} Universidad de La Coruña. E. T S. de Ingenieros de Caminos.

Al hilo de lo discutido en el reciente *V Congreso Nacional de Firmes*, sobre las capas de base de los firmes, en este artículo se exponen las misiones de las bases granulares en cada tipo de firme, con algunas notas de la importancia de los riegos de imprimación y de evitar la segregación, como principal enemigo de la respuesta de estos materiales a lo largo de su vida. Finalmente, se exponen algunas conclusiones que resumen estas misiones, y combaten algunas concepciones falsas que pueden escucharse en algunas ocasiones.

Con motivo de la celebración del *V Congreso Nacional de Firmes*, celebrado en León a finales de mayo pasado, con *Aurelio Ruiz*: como ponente general dedicado a las capas de base de los firmes, se ha pasado revista al estado del arte del diseño y la construcción de estas capas. En resumen, las capas de base pueden estar constituidas por materiales granulares, materiales tratados con cemento y materiales bituminosos. Las ponencias presentadas resumen bien el estado del arte en la actualidad en estos materiales.

En cualquier caso, conviene tener en cuenta desde el principio que los materiales empleados en capas granulares deben ser considerados como materiales manufacturados, haciendo hincapié en su necesaria calidad, homogeneidad y cuidada puesta en obra. En ocasiones, el bajo precio de estos materiales en los proyectos y obras de carreteras puede tener como consecuencia un descuido de su calidad, que suele resultar fatal para el comportamiento del firme a largo plazo. Debe evitarse, por su elevado coste, la tentación de arreglar con más mezcla bituminosa los defectos del material de la base.

La diferencia de módulos de deformación entre las capas tratadas y las capas granulares es muy elevada, particularmente cuando las temperaturas son bajas en el caso de capas bituminosas, y siempre en el caso de materiales tratados con cemento. Cualquier descenso en los módulos de la capa granular agrava esta diferencia, y un incremento de coste de los materiales granulares, que son, con diferencia, los más baratos, incide de forma limitada en el coste total del firme, con la excepción de los firmes formados por una capa granular y un tratamiento superficial.

Empleo y función de las capas granulares

El comportamiento de los materiales granulares está caracterizado por la formación de un esqueleto mineral capaz de resistir las cargas de tráfico con deformaciones permanentes mínimas. Para ello es preciso lograr una alta compacidad y, simultáneamente, suficientes puntos de contacto entre las partículas de árido grueso.

Los materiales granulares desempeñan un importante papel estructural en los firmes de carreteras. En general, las capas granulares se emplean en capas inferiores, que habitualmente se denominan *de base* y *subbase*, si bien esta denominación no es siempre uniforme.

Con carácter general, las misiones de una capa granular son las siguientes:

- a) Ser el cimiento de las capas superiores, de forma que la deflexión elástica y los esfuerzos en ellas estén dentro de un rango admisible.
- b) Distribuir las tensiones, de forma que las tensiones verticales en la cara superior del material subyacente sean suficientemente bajas para la calidad de este material. De esta manera se reduce el riesgo de que se produzcan deformaciones permanentes (*roderas*) a causa del excesivo esfuerzo del cimiento del firme.
- c) Ser una plataforma de trabajo adecuada para la construcción de las capas superiores.
- d) Actuar como una capa de resistencia y calidad intermedia entre las capas inferiores y las superiores.
- e) Reducir o evitar el efecto climático de la helada, en las zonas en las que puede producirse este efecto.
- f) En las ocasiones en las que así se decida, actuar como capa drenante.
- g) Actuar como un firme provisional durante la obra, en caso de que no existan accesos alternativos.

Sin embargo, la misión principal de las capas granulares es claramente distinta según el tipo de firme bajo el que se disponen, dado que varía la carga que se transmite a estos materiales. A continuación se enuncian estas misiones en cada tipo de firme. Aunque la definición concreta no está explícita en ningún documento oficial, puede considerarse que los *firmes flexibles* son aquellos que tienen menos de 15 cm de capas bituminosas, mientras que los *semiflexibles* disponen de más de 15 cm.

Capas de subbase

Las misiones de la *subbase* son varias: ofrecer un asiento de calidad y resistencia mecánica adecuada a las capas superiores, dar una mejor transición de módulos de deformación, con saltos menores entre las capas, y separar de las cargas a los materiales que constituyen el cimiento del firme.

De estas misiones, la principal es la primera, dado que, en efecto, la compacidad alcanzada en una capa de base depende en gran medida de la compacidad de la capa inferior. El aporte estructural de la subbase depende de sus características propias (granulometría y plasticidad, sobre todo), del espesor de la capa y de la calidad del cimientado.

Capas de base

En firmes flexibles

En un *firme flexible* (formados por capas granulares y bituminosas, con un espesor total de mezclas bituminosas inferior a 15 cm), la capa granular soporta una gran parte de las cargas de tráfico. Los materiales de rodadura tienen un aporte estructural muy reducido. Por ello, el objetivo principal debe ser disponer un material de resistencia elevada. La misión principal es la mencionada en primer lugar más arriba (misión (a)), ser un cimientado suficientemente resistente de las capas superiores.

En firmes semiflexibles

En *firmes semiflexibles* (formados por capas granulares y bituminosas, con un espesor total de mezclas bituminosas no inferior a 15 cm), el espesor y módulo de las capas bituminosas hace que las capas granulares estén poco solicitadas en cuanto a esfuerzos. La misión principal de las capas granulares es, entonces, proporcionar un cimientado adecuado a las capas superiores.

En otros firmes

En firmes con capas tratadas con cemento no se disponen bases granulares. Debido a la rigidez de estas capas, las solicitaciones transmitidas a las capas inferiores son muy reducidas. Sin embargo, el empleo de capas granulares se proscribió en el caso de tráfico elevado, a causa de la erosionabilidad de los materiales, lo que puede descalzar los pavimentos de hormigón, y la menor calidad de la plataforma de trabajo que constituyen.

Si la categoría de tráfico es baja (**T3** o inferior) se emplean capas de base granulares sobre la explanada, si ésta es de calidad insuficiente. En este caso se pueden emplear zahorras naturales, ya que la rigidez del hormigón hace que las tensiones transmitidas a la base sean muy bajas. Es más importante atender a la drenabilidad y no a la erosionabilidad del material.

Capas drenantes

El empleo de capas granulares drenantes debe considerarse con cierto cuidado. En efecto, las capas drenantes pueden dar un resultado mecánico muy similar a las no drenantes, pero su compactación resulta difícil. Además, las capas drenantes canalizan el agua a su través, por lo que a veces son un camino de entrada de agua en el firme, además de serlo de salida.

En todo caso, la *Instrucción 6.1 y 2 IC de Firmes*, del Ministerio de Fomento, limita el empleo de zahorras drenantes a:

- La subbase: Si la explanada no estuviera estabilizada y su índice de plasticidad fuera superior a 10, la zahorra natural debería ser drenante y desaguar a un sistema de drenaje adecuado.
- En arcenes pavimentados con mezcla bituminosa, con zahorra artificial drenante, cuando el pavimento de la calzada está formado por mezclas bituminosas (con categorías de tráfico **T0** o **T1**), con un espesor mínimo de 18 cm, o en arcenes de calzadas con pavimento de hormigón vibrado (con tráfico **T1**).
- En arcenes pavimentados con un tratamiento superficial mediante riego con gravilla sobre zahorra artificial. Esta zahorra artificial deberá ser drenante si el pavimento de la calzada fuera de hormigón vibrado.

El papel del riego de imprimación

Sobre la zahorra artificial (y, en su caso, *macadam*) que vaya a recibir una capa de mezcla bituminosa o un tratamiento superficial, deberá previamente efectuarse un riego de imprimación, cuya correcta ejecución es fundamental para el buen comportamiento del firme.

Si el riego es de calidad suficiente se llega a lograr una solidaridad alta entre las capas, por lo que puede considerarse que las capas están pegadas en el cálculo analítico.

Para que el riego sea eficaz es preciso que se realice un barrido energético que elimine el polvo de la superficie de la capa granular. La penetración del ligante es alta en zahorras muy limpias ($EA > 50$), pudiendo aumentarse si se efectúa un riego con agua previo al barrido. Se emplean emulsiones especiales (*EAI* o *ECI*), pudiendo emplearse emulsiones de rotura lenta. El riego se realiza con tanque, dosificando el ligante de forma que se emplee la cantidad que podrá absorber la capa granular en 24 horas, entre 1 y 1,5 kg/m² de emulsión, es decir, entre 0,5 y 0,8 kg/m² de ligante residual. Se dispone un árido que permita absorber el ligante sobrante, de arena no plástica con tamaño máximo inferior a 6 mm, coeficiente de limpieza inferior a 2 y equivalente de arena superior a 40. Tiempo mínimo entre la aplicación del árido y la ejecución de la capa superior, y ningún tráfico sobre la emulsión.

Puesta en obra

En este apartado se discuten los aspectos más relevantes de la puesta en obra que inciden en la calidad final de las capas granulares. Los riesgos principales derivados de la puesta en obra de materiales granulares son la segregación, la contaminación, la compactación y la ejecución del riego de imprimación en la superficie de contacto entre capas granulares y capas bituminosas.

En la introducción se ha insistido en que las capas granulares pueden prestar un servicio de alta calidad al firme. Para ello es preciso, por un lado, considerarlas un producto manufacturado, en

el que deben controlarse con rigor los materiales y el proceso de puesta en obra; por otro, elaborar un precio suficientemente adecuado a la calidad del material que se desea y las tareas que se van a exigir en su acopio, transporte y puesta en obra. La falta de sintonía en las dos partes del proceso sólo puede resultar en una merma de la calidad de la capa. Es probablemente en la puesta en obra donde se cometen más errores que inciden en la calidad de la capa, y, por tanto, en la respuesta del filme.

La puesta en obra de una capa granular comprende las siguientes operaciones:

- 1) Elaboración del material: machaqueo, tamizado y recomposición
- 2) Acopio
- 3) Transporte
- 4) Extendido
- 5) Compactación
- 6) Ejecución del riego

Elaboración

Durante la elaboración del material hay que afinar el proceso de machaqueo de forma que se optimice el aprovechamiento del recurso, pero manteniendo la calidad del producto y su limpieza. Las machacadoras pueden ser primarias, secundarias o terciarias.



Planta de fabricación de áridos

En el caso de yacimientos, los procesos de lavado deben de ser suficientes para eliminar la arcilla adherida a los granos. En todo caso, en zahorras artificiales en secciones de firme para tráficos importantes, y con las distancias de transporte habituales (una media de 20 km, con puntas de hasta 60 km), la mejor garantía de la homogeneidad de la granulometría sería una recomposición final con un número suficiente de fracciones (puede pensarse en cuatro). Esta operación, no habitual en España, es tanto más importante cuanto mayores sean las solicitudes de las cargas a las capas granulares (es decir, en firmes flexibles con tráficos agresivos, bien por su intensidad media diaria o bien por las características de cada carga aplicada).

La lucha contra la segregación

Una preocupación permanente en las capas granulares, pero no sólo en ellas, es evitar la segregación de los áridos durante la fabricación, el transporte, los acopios y la puesta en obra. La segregación es más importante cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menor el contenido de finos, e inadecuada (por demasiado alta o demasiado baja) la humedad del material. También influyen la forma de realizar los acopios y la carga, así como los medios empleados para el extendido.



Acopio cónico. Es preferible acopiar por tongadas para evitar la segregación

Para evitar en lo posible la segregación es preciso:

- Limitar la altura de caída del material en caso de carga y transporte por cintas o cargadoras.
- Limitar el tamaño máximo del árido.
- Prehumectar el árido en planta y en los acopios, de forma que la humedad esté próxima a la óptima.
- Disponer acopios en cantera, en lo posible, no cónicos, especialmente si el tiempo de almacenamiento es largo. En caso contrario, debe realizarse una recomposición final antes de la puesta en obra.
- Emplear una extendedora para su puesta en obra (mejor que la alternativa habitual, la motoniveladora).
- ***Puesta en obra***

Por las razones mencionadas en este apartado, es preferible extender con extendedora que con motoniveladora. En cualquier caso, si se emplea la motoniveladora la cuchilla debe trabajar próxima a la plena carga, y aproximadamente perpendicular a la trayectoria de la motoniveladora. En un caso ideal, y especialmente si las distancias de transporte son altas, debe realizarse una recomposición del material antes de la puesta en obra.



Zahorra con excesiva segregación

Compactación

En España las especificaciones son de producto final, y no de proceso. Los materiales deben compactarse hasta alcanzar:

- En zahorras naturales, una densidad no inferior a la que corresponda al 97% de la máxima obtenida en el ensayo *Proctor Modificado*, en caso de tráfico pesado y medio (**T0**, **T1** y **T2**). Cuando la zahorra natural se emplee en calzadas para tráfico inferior (**T3** o **T4**), o en arcenes, se admitirá una densidad no inferior al 95% de la máxima obtenida en el ensayo *Proctor Modificado*.
- En zahorras artificiales, una densidad no inferior a la que corresponda al 100% de la máxima obtenida en el ensayo *Proctor Modificado*, en caso de tráfico pesado y medio (**T0**, **T1** y **T2**). Cuando la zahorra artificial se emplee en calzadas para tráfico inferior (**T3** o **T4**), o en arcenes, se admitirá una densidad no inferior al 97% de la máxima obtenida en el ensayo *Proctor Modificado*.

La compactación se realiza con rodillos vibratorios y/o compactadores de neumáticos pesados, realizando un tramo de prueba.



Zahorra bien colocada bajo mezcla bituminosa, en un firme semiflexible

El espesor de tongada debe ser, en general, menor de 25 cm y mayor de 15 cm, si bien algunos autores, y el propio *PG-3*, permiten llegar a los 30 cm. Hay que hacer notar que la puesta en obra en más tongadas permite que se alcancen módulos muy superiores a la alternativa de disponer una única tongada. A este respecto, debe recordarse que el módulo va aumentando a medida que aumenta el del cimientto.

La compactación de estos materiales puede ser compleja, especialmente si no existe un contenido de finos mínimo. Para facilitar la compactación conviene emplear tongadas de espesor reducido. La tarea de compactar es ingrata, por lo que es preciso concienciar a los maquinistas de la importancia de su trabajo, e intentar automatizarlo todo lo posible. Un desarrollo reciente ha permitido implantar instrumentos que permiten que el conductor del compactador pueda medir la mejora inducida en cada pasada, con lo que se mejora la capacidad de control. En todo caso, el control debe ser próximo a la continuidad, y no sólo a una cierta hora del día.



Zahorra en base de firme flexible

Debe disponerse una humedad próxima a la óptima (menos del 1% de diferencia). Se prefiere, en general, la compactación por el lado seco, pero siempre dentro del margen antedicho. Esta humedad no debe establecerse únicamente mediante el riego, a partir de un material seco, sino que deben realizarse correcciones al alza con respecto de la prehumectación en acopio o en planta. El exceso de riego conduce a la saturación de los materiales granulares, con el consiguiente empeoramiento de la compactación. Además, la humectación por riego no garantiza la homogeneidad de la humedad, y, dadas las características de escasa permeabilidad de las capas, este agua tarda mucho tiempo en disiparse.

El exceso del número de pasadas conduce a una mayor alteración granulométrica, particularmente en la parte superior de la capa, por lo que tampoco es la solución adecuada a una humedad inadecuada.

Es conveniente obtener una elevada regularidad superficial en las capas granulares, para poder alcanzar los objetivos marcados de *IRI* en rodadura, particularmente si se trata de firmes flexibles. Para ello se debe, dentro de lo posible:

- Emplear una extendedora para la puesta en obra, y

- limitar el tamaño máximo del árido.

Tramos de prueba

Los tramos de prueba, preceptivos de acuerdo con la normativa, deben realizarse con plazo suficiente para corregir los eventuales defectos del proceso, y no ser los primeros metros de la obra ya a pleno rendimiento. Debe ser posible establecer cambios en la granulometría, acopio, humectación, espesor y número de tongadas y número de pasadas del compactador.

Conclusiones

Las capas granulares son capas de firme compuestas por materiales que deben ser contemplados como materiales de calidad, en los que merece la pena invertir. Son materiales manufacturados, frente a los todo-unos de cantera o las gravas. Es preciso someterlos a tratamiento hasta que se conviertan en un material homogéneo y de suficiente calidad.

Las capas granulares cumplen una función clara dentro del firme, si bien esta función es ligeramente distinta dependiendo del tipo de firme en el que se encuentran. En cualquier caso, es posible obtener capas de suficiente calidad, elevada compactación y adecuada durabilidad. Para ello es necesario respetar la calidad mínima exigida a los de los materiales, y tener precauciones durante la fabricación, puesta en obra y construcción de las capas.

Los materiales granulares carecen de cohesión, por lo que sufren en mayor medida las peculiaridades de las cargas de tráfico, caracterizadas por pulsos de carga en los que se produce una rotación de las tensiones principales y un camino de tensiones complejo.

A la hora de abordar el proyecto de una capa granular debe establecerse una lista de funciones que debe desempeñar la capa. Esta lista debe realizarse por orden de prioridad, comprobándose que el material cumple con las misiones deseadas, está disponible y es económicamente competitivo con otras alternativas.

En el cálculo analítico se observa que las capas tratadas tienen módulos muy superiores a las de las capas granulares, por lo que la consecución de módulos mayores en estas capas se traducirá en un menor castigo de las capas tratadas y, consecuentemente, en una mayor vida útil del firme. Asimismo, la limitación de los módulos de las capas tratadas, con el empleo de mezclas en frío, ayuda a una mejor transición de módulos.

En todo caso, los módulos asignados a las capas no pueden ser arbitrarios, e independientes de los materiales y técnicas empleadas en cada caso. Debe recordarse que los módulos de las capas granulares no pueden ser superiores a 2,5 o, como máximo, 3 veces el de la capa subyacente, a menos que el total de los materiales dispuestos en tongadas de espesor adecuado supere el metro de espesor. Asimismo, en el caso de explanadas débiles, una misión importante de la subbase es alejar la explanada de las cargas. Es, por tanto, difícil disminuir los espesores, a menos que ello se haga

con materiales mucho más rígidos y resistentes. Entre materiales granulares la diferencia no es suficiente para que esta disminución sea posible, y los cálculos analíticos realizados con un análisis de sensibilidad lo demuestran.

Por tanto, la mejora de los módulos se basa en dos variables: el espesor de la capa y el módulo de la capa subyacente. Por ello, disponer los materiales granulares en varias tongadas, compactando adecuadamente cada una de ellas, contribuye a una mejor transición de módulos, y permite que la sección funcione de forma más homogénea. Las capas superiores tratadas con betún se fatigarán menos, al disponer de un apoyo más rígido, y estar, consecuentemente, menos solicitadas. Por la misma razón, las mezclas bituminosas en frío, cuyos módulos son menores, ayudan a esta transición de módulos.

La compactación de los materiales es fundamental para su respuesta frente a las cargas. Por ello, es importante humectar los áridos en central o en acopio, donde es más sencillo lograr la mezcla íntima y homogénea de agua y árido, y evitar el riego desmedido en la obra, así como el aumento excesivo del número de pasadas. En todas las fases de la construcción hay que tomar medidas que eliminen o minimicen la segregación de los áridos.

Por último, hay que destacar que la consecución de una calidad elevada es imposible si el precio que se paga es demasiado bajo. Debe elaborarse un precio adecuado para la calidad que es deseable conseguir, y las operaciones que se van a exigir. Un precio adecuado, unido a un control suficiente y al empleo de técnicas precisas y modernas como la recomposición a partir de varias fracciones, la limitación del tamaño máximo la puesta en obra con extendidora, y otra descritas en el texto, darán como resultado unas capas resistentes y duraderas.