



## UTILIZACION DE LOS HORMIGONES COMPACTADOS EN CARRETERAS (Aspectos generales)

Por CARLOS JOFRE, RAFAEL FERNANDEZ  
Y ALEJANDRO JOSA (\*)

**U**no de los materiales para carreteras cuyo empleo ha despertado mayor interés en los últimos años en un gran número de países es el hormigón compactado con rodillo. En realidad, la utilización del hormigón seco constituye un retorno a los orígenes, ya que los pavimentos de las primeras carreteras de firmes rígidos se construyeron mediante compactación con rodillo, años antes del descubrimiento de la vibración como método para compactar el hormigón. Una serie de ventajas de tipo económico, la no necesidad de maquinaria especial, la posibilidad de apertura inmediata a la circulación de la obra, y un abanico variado de aplicaciones, son las causas principales del nuevo interés por este material de construcción.



## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Definición del hormigón compactado

Uno de los materiales para carreteras cuyo empleo ha despertado un mayor interés en los últimos años en un gran número de países es el hormigón compactado con rodillo.

Se trata, tal y como define la Instrucción española de Secciones de Firme de Autovías, de una mezcla homogénea de áridos, agua y conglomerante, que se pone en obra de forma análoga a una grava-cemento, aunque su contenido de cemento es similar al de un pavimento de hormigón vibrado.

Las características principales de este material son:

- Fabricación en plantas continuas de grava-cemento o en centrales de hormigón discontinuas.
- Puesta en obra con la maquinaria utilizada para las gravas-cemento o con la utilizada para aglomerados asfálticos.
- Contenido en cemento similar al de un hormigón clásico; el cemento puede ser con alto contenido en cenizas volantes o escorias. En algún caso puede recurrirse a una mezcla de un P-450 con cenizas volantes silicónaluminosas, en proporciones que dependerán del cemento y de la ceniza.

Para evitar el realizar una serie de ensayos previos que nos garanticen la mezcla, es aconsejable la utilización de cementos tipo PUZ-II o los cementos tipo V definidos en la nueva norma UNE 80.301.

- Bajo contenido de agua (normalmente entre el 4,5% y el 6%), que se aproxima mucho al del óptimo del ensayo Proctor modificado (OPM).
- Índice de «capacidad soporte inmediata alto», lo que permite que sea puesto bajo circulación nada más finalizar su compactación en obra.

La definición de la Instrucción de Autovías deja claro que se trata de una técnica híbrida entre las bases tratadas y los pavimentos de hormigón. La atención que se viene prestando a la misma no debe extrañar si se considera que

gracias a ella es posible salvar una serie de limitaciones que presentan las técnicas de las que se deriva:

- con respecto a las gravas-cemento:
  - Al disminuir la relación agua/cemento, la **retracción hidráulica es menor**. En hormigones pervibrados para pavimentos, la relación a/c es del orden de 0,45 – 0,50, mientras que en un hormigón compactado con 300 kg/m.<sup>3</sup> de cemento y un 5% de agua, dicha relación desciende a 0,35. Por el contrario, en una gravacemento con un 3,5%, la relación a/c aumenta hasta casi 1,5. Ello se traduce, en general, en una separación entre fisuras bastante superior a la habitual en las gravas-cemento.
  - Al aumentar el contenido de conglomerante, las variaciones del mismo originadas por los sistemas de dosificación (sobre todo en las plantas de tipo discontinuo) tienen una menor influencia en las resistencias alcanzadas por el material.
- con respecto a los pavimentos de hormigón vibrado:
  - La no necesidad de maquinaria especial, lo cual representa un menor coste de ejecución.
  - La posibilidad de apertura inmediata a la circulación, debido a la estabilidad que se alcanza con el propio esqueleto mineral de los áridos una vez compactado el material. Con ello, en el caso de refuerzos de carreteras bajo tráfico, la mejor forma de usar el hormigón es con esta tecnología.

Por ello se ha llegado a afirmar que «es dudoso que una tecnología de pavimentación haya tenido nunca el potencial para unos ahorros tan significativos así como un potencial para unas aplicaciones tan variadas» como la del hormigón compactado.

Por supuesto este material presenta algunas limitaciones, que por el momento todavía no han podido ser superadas, y entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- Es difícil conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con motoniveladora. Hace falta una base extendida con hilo y extendidora con patin para el hormigón seco. En

los casos de extendido con motoniveladora, se recomienda un reperfilado antes de terminar totalmente la compactación.

- La sensibilidad a las variaciones de humedad en el mezclado y extendido del material, así como en los defectos de compactación, que se traducen en un acusado descenso de las resistencias.
- Para tráfico importantes hay que colocar una capa de rodadura asfáltica, perdiéndose las ventajas de luminosidad del hormigón tradicional.

### 1.2. Desarrollo histórico

En realidad, la utilización del hormigón seco en carreteras constituye un retorno a los orígenes de los pavimentos de hormigón. No hay más que recordar que los primeros firmes rígidos fueron construidos hace más de un siglo; mientras que el descubrimiento de la vibración como método para compactar el hormigón es mucho más reciente. Se puede citar como ejemplo a este respecto el caso de Francia, en donde la puesta en servicio de la primera auténtica carretera de hormigón se remonta a 1925, cerca de Arras. El pavimento se construyó en aquella ocasión mediante compactación con rodillo, de forma análoga a una calzada de material granular.

Posteriormente, las mejoras obtenidas en los sistemas de vibración del hormigón y las ventajas que el empleo de los mismos suponían para la consecución de un pavimento de calidad, unido todo ello a los medios de compactación poco eficaces de que se disponían, trajeron consigo el abandono casi total del hormigón compactado con rodillo en pavimentos, si bien continuaron utilizándose las mismas técnicas en las gravas-cemento de las capas de base. En este sentido, los avances experimentados por las gravas-cemento a lo largo de más de 30 años han sido de gran utilidad para el desarrollo de los actuales hormigones compactados.

En España, las primeras aplicaciones de las que se tienen datos se realizaron alrededor de 1970 en la provincia de Barcelona. Se trata de pavimentos sometidos fundamentalmente a tráfico ligeros, situados en urbanizaciones residenciales, vías urbanas y caminos rurales. Esta técnica ha sido desarrollada por algunos contratistas locales de una



forma que podría calificarse como autodidacta; y si bien, al estar poco tecnificadas las empresas que promovieron esta tecnología, estas obras se han realizado sin estudios de laboratorio previos y sin suficientes controles durante la ejecución para determinar las densidades y resistencias obtenidas, el comportamiento de las mismas permite afirmar que a través de la práctica se ha llegado a una tecnología totalmente adecuada a los tipos de vías en los que se ha utilizado.

En Francia, el desarrollo moderno de la técnica del hormigón compactado se ha iniciado asimismo en realizaciones para tráficos poco importantes, pero los buenos resultados obtenidos, por un lado, y la búsqueda de soluciones que economizan productos petrolíferos, por otro, han hecho que tanto su empleo como sus campos de aplicación hayan ido en aumento, utilizándose ya incluso para refuerzos de carreteras nacionales bajo circulación, con tráficos T1. La experiencia obtenida ha permitido que se hayan podido elaborar a finales de 1985 unas Recomendaciones Oficiales para la Realización de Calzadas en Hormigón Compactado. Como capa de rodadura y protección se utiliza normalmente, por razones económicas, un tratamiento superficial monocapa de doble engravillado, con betunes modificados. En caso de tráficos importantes, con exigencias de regularidad superficial altas, puede ser necesario el uso de capas delgadas de aglomerados asfálticos en caliente.

En Norteamérica las técnicas del hormigón compactado se han desarrollado inicialmente pensando en su empleo en presas, campo en donde este material presenta igualmente un futuro muy prometedor. En este sentido, además de las grandes realizaciones extranjeras (presas de Willow Creek en Estados Unidos, de Shimajigawa en Japón, etcétera), destacar que España cuenta ya con algunos ejemplos, como el de la presa de Castilblanco (Sevilla) y un estribo de la presa de Bayona (Pontevedra), ambas en servicio; o la presa de Los Morales, en Madrid, actualmente en construcción. Dentro del terreno de la pavimentación, el hormigón compactado con rodillo ha sido utilizado preferentemente en Norteamérica en áreas sometidas a tráficos muy pesados (zonas de manipulación de troncos o containers en puertos, pistas militares de ma-



*Refuerzo de carretera de tráfico pesado con hormigón compactado en Francia.*

niobras de tanques, estacionamientos de aeropuertos, etc.). En este caso, el pavimento de hormigón compactado se ha dispuesto, en general, sin ninguna capa de protección superficial, habiendo existido un buen comportamiento aún en aquellos situados en regiones como Columbia Británica, con inviernos muy duros.

Por lo que se refiere a España, independientemente de las aplicaciones mencionadas para tráficos ligeros, se posee ya una amplia experiencia en la utilización del hormigón compactado en carreteras soportando tráficos medios y pesados. La primera realización en este campo la constituyó el pavimento del túnel del Cadi, en la provincia de Barcelona, construido en septiembre de 1984. Posteriormente se ha empleado tanto en obras nuevas (polígono industrial de Alcobendas y viales del Parque Tierno Galván, en Madrid; variantes de Llodio y Aguilas) como en ampliaciones de obras existentes (carril adicional en CN-II, en Madrid) o en refuerzos (Villasanta, Bétera, Santiponce, Alcañiz). Puede estimarse que en este momento

se han construido con hormigón compactado unos 300.000 m.<sup>2</sup> de carreteras. Paralelamente han continuado las experiencias en pavimentos sometidos a tráficos ligeros, pudiendo señalarse a este respecto una serie de realizaciones en Madrid, Tarragona y Asturias. Algunas de estas obras serán tratadas con más detalle a lo largo de este artículo. Se ha publicado recientemente (septiembre 1985) la primera normativa oficial española sobre hormigón compactado, incluida dentro de la Instrucción sobre Secciones de Firme en Autovías.

Otros países europeos (Noruega, Suecia) están comenzando a utilizar el hormigón compactado de forma regular, mientras que en otros casos (Argentina, Japón, Alemania, Checoslovaquia...) se han construido o se van a construir en un corto plazo los primeros tramos con dicho material. Hay que destacar a este respecto el caso de Argentina, en donde España ha actuado como auténtica exportadora de tecnología, tanto a través de las visitas de algunos ingenieros de dicho país a las principales realizaciones españolas, como por la difusión que de los resultados de las mismas han realizado otros ingenieros españoles en la propia Argentina.

Una de las razones de este interés a escala internacional radica en el hecho de que en países sin gran tradición de construcción de pavimentos de hormigón, las empresas constructoras no poseen la maquinaria especializada necesaria (pavimentadoras de encofrados deslizante, trenes tradicionales sobre encofrados) pero suelen estar bien equipadas con equipos de movimiento de tierras y maquinaria para el extendido y compactación de aglomerado asfáltico. En estos casos, la tecnología de hormigones secos compactados permite la aplicación de la solución rígida sin tener que hacer nuevas inversiones en maquinaria.

También es una solución que permite el uso de áridos calizos al 100%, dejando la resistencia al deslizamiento confiada al tratamiento superficial. El límite de finos pasando por el tamiz de 0,08 mm, que para hormigones pervibrados es del 5% en general y del 7% en el caso de finos calizos, puede ser más tolerante, con lo que se facilita el uso de áridos locales en un gran número de zonas.



## 2. DISEÑO

### 2.1. Espesores y resistencias. Bases

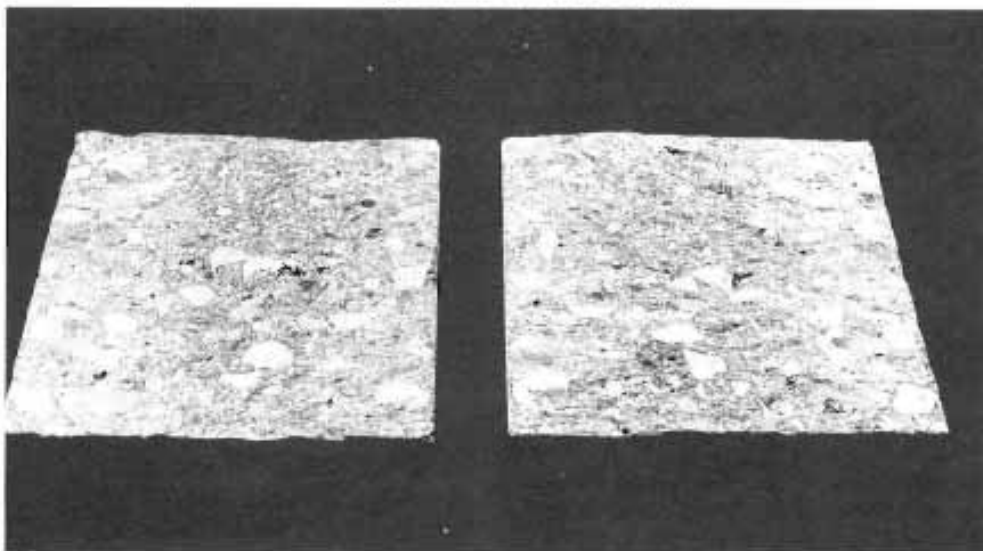
Al asimilarse los hormigones tradicionales, los criterios de proyecto respecto a espesores, resistencias a flexotracción y tipos de base pueden ser los mismos que los seguidos para aquellos. Por lo tanto, son aplicables en principio las secciones tipo de la Norma 6.2 IC para los casos en los que no se prevé disponer ninguna capa de protección sobre el hormigón compactado, o bien como máximo un tratamiento superficial, cuya contribución desde el punto de vista estructural puede considerarse despreciable. Aunque algunos resultados parecen indicar un mejor comportamiento estructural, aún es prematuro hacer ningún tipo de modificaciones en espesores o resistencias. No obstante, si por razones de regularidad superficial se proyecta una capa superior de algunos centímetros de aglomerado, puede contarse entonces con una pequeña reducción en el espesor del hormigón compactado. A este respecto, la Instrucción de Autovías admite como equivalentes las siguientes secciones:

- Para tráfico TO (más de 2.000 vehículos pesados/día) y explanada E3:
  - 28 cm. de hormigón vibrado HP-45.
  - 15 cm. de hormigón magro o gravacemento resistente a la erosión.
- O bien:
  - 8 cm. de mezcla bituminosa.
  - 25 cm. de hormigón compactado.
  - 20 cm. de suelocemento.
- Para tráfico T1 (entre 750 y 2.000 vehículos pesados/día) y explanada E3:
  - 25 cm. de hormigón vibrado HP-45.
  - 15 cm. de hormigón magro o gravacemento resistente a la erosión.
- O bien:
  - 8 cm. de mezcla bituminosa.
  - 22 cm. de hormigón compactado.
  - 20 cm. de suelocemento.

Estas reducciones de espesor pueden justificarse utilizando modelos matemáticos basados en la teoría elástica multicapa (por ejemplo, el del programa ALIZE III del Laboratorio de ponts et



Camino rural con pavimento de hormigón compactado (Barcelona).



Probeta de hormigón compactado ensayada a tracción indirecta.

Chaussées français). En estos estudios suele ser habitual asignar al hormigón compactado un módulo de elasticidad  $E$  igual a 280.000 MPa, y un coeficiente de Poisson de 0,25.

Este mismo sistema puede utilizarse para el dimensionamiento de casos no tipificados (por ejemplo, zonas portuarias o, en el extremo opuesto, pavimentos para tráfico muy ligeros, como los de las urbanizaciones residenciales) y la comparación de las soluciones obtenidas con otras alternativas. Para tener en cuenta los efectos de las juntas y fisuras es preciso mayorar en un 40-50% los resultados proporcionados por el análisis multicapa, el cual como es sabido, está basado en la hipótesis de que las distintas capas del firme tie-

nen dimensiones infinitas en planta. En cualquier caso, el espesor mínimo a utilizar no debe ser inferior a 15 cm., por razones constructivas. Si por cálculo resultase un espesor inferior a 15 cm. puede disminuirse la resistencia adoptada como dato de partida reduciendo el contenido de cemento.

Al ser complicada la confección de probetas prismáticas para su ensayo en flexión, las resistencias a exigir deben referirse al ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño) sobre probetas cilíndricas de 15 cm. de diámetro. En lo que se refiere al método de confección de dichas probetas, la Instrucción de Autovías prescribe el empleo del martillo vibrante, de acuerdo con la norma NLT





Dispositivos para confección de probetas de hormigón compactado: Martillo vibrante.

310/79. Se obtienen así probetas de 18 cm. de altura, fabricadas en tres capas. No obstante, tanto este método como el de la maza Proctor presentan el inconveniente de una posible rotura de los áridos en el caso de que éstos no sean muy duros, con lo cual se altera la granulometría del material. Por ello, parece más adecuado el método del consistómetro VeBe, en el que las probetas, de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura se confeccionan en tres capas mediante vibrocompresión. Cada capa es compactada mediante el efecto combinado de un contrapeso de 20 libras (9,07 kg.), dejado libremente sobre su superficie, y de la vibración del consistómetro durante un tiempo de 35 segundos. Este método es utilizado con frecuencia en Estados Unidos. En Francia se especifica el ensayo a tracción directa de probeta cilíndricas de 16 cm. de diámetro y 32 cm. de altura, confeccionadas mediante un sistema similar, utilizando un dispositivo de vibrocompresión desarrollado por el Laboratorio de Ponts et Chaussées.

La edad de ensayo depende del tipo de conglomerante utilizado. Si se emplean cementos de fraguado normal (tipos I o II) suelen imponerse resistencias a 28 días. Sin embargo, resulta muy adecuado en los hormigones compactados el empleo de cementos tipo V, con un elevado contenido de adiciones activas y un endurecimiento lento. En



Consistómetro VeBe.

este caso, deben ensayarse a 56 días e incluso a 90 días, exigiéndose a estas edades los mismos valores que se imponen a 28 días en los hormigones compactados en los que se utilicen cementos de fraguado normal. Al mismo tiempo, deben realizarse también ensayos previos a edades más tempranas, a fin de establecer correlaciones razonables para el control de obra.

Para tráfico importantes, suelen exigirse unas resistencias medias en trac-

ción indirecta iguales a 3,3 MPa. Este valor equivale aproximadamente a 4,5 MPa de resistencia característica a flexotracción (hormigón HP-45); o bien a 5,5 MPa de resistencia media también a flexotracción. Para obtener un hormigón equivalente a un HP-40 la resistencia media a tracción indirecta debe ser igual a 2,8 MPa.

En lo que se refiere al tipo de bases a utilizar bajo los pavimentos de hormigón compactado, en principio parece que deberían asimismo mantenerse las mismas que figuran en los catálogos para pavimentos de hormigón vibrado. Sin embargo, es posible que un conocimiento más profundo del comportamiento de estos firmes permita, en un futuro, rebajar las exigencias actuales. Por otra parte, si se dispone encima del hormigón compactado una capa de mezcla bituminosa, la estructura del firme puede asimilarse al de una calzada semirrígida, en donde no son frecuentes los problemas de bombeo y escalonamiento en fisuras. En las aplicaciones españolas en tráfico ligero (T4), la capa de hormigón seco se ha dispuesto en general directamente sobre la explanada. En Francia y otros países, con tráfico inferiores a 300 camiones/día se han utilizado bases granulares sin tratar (zahorras artificiales), mientras que para tráfico superiores se han empleado bases de gravacemento. La Instrucción española de autovías prescribe el empleo de una subbase de suelo-cemento de 20 cm. de espesor. No hay que olvidar a este respecto que las condiciones de la superficie sobre la que se apoya tienen una gran influencia en la consecución de una buena calidad en una capa de material tratado con cemento. Por ello, el catálogo francés de estructuras de calzada solo admite la utilización, bajo bases de grava-cemento, de subbases también de grava-cemento; mientras que las primitivas secciones estructurales de la Norma 6.1-IC con bases de gravacemento y subbases granulares fueron posteriormente eliminadas en los casos de tráfico importantes.

## 2.2. Juntas

La necesidad o no de disponer juntas en los pavimentos de hormigón compactado es una cuestión muy debatida.



### 2.3. Textura superficial

Con objeto de conseguir una textura antideslizante, hay que dar algún tratamiento a la terminación que produce el paso de los rodillos vibrantes o compactadores de neumáticos.

Si la regularidad superficial es buena, es suficiente un tratamiento superficial con ligantes modificados. Si por el contrario deja que desear, habría que acabar con una capa de aglomerado asfáltico de composición bien estudiada, dado que suele ser de pequeño espesor.

Como ya se ha indicado anteriormente, en la Instrucción de Autovías se ha previsto la extensión de una capa de mezcla bituminosa de 8 cm. de espesor sobre el hormigón compactado. No obstante, en las realizaciones españolas para tráficos menos importantes, en las que se ha empleado la terminación con aglomerado, el espesor de dicha capa no ha sido superior a 5-6 cm.

En el caso de vías de baja velocidad en las que se quiera dejar la terminación en hormigón, puede procederse de la forma siguiente:

- Después de realizada la compactación pueden darse unas pasadas adicionales, previa la extensión de una lechada de cemento que cierre totalmente el pavimento.
- Como terminación superficial y para eliminar el posible exceso de lechada, se procede a un fratasado mecánico con helicóptero.

Este acabado es sólo recomendable para velocidades inferiores a 40 kilómetros/hora, como suele ser el caso de urbanizaciones residenciales, aparcamientos industriales, etc. En este caso, el tráfico no debe circular hasta pasadas unas horas, para no borrar la pequeña textura del fratasado. El curado se hará con producto filmógeno y no con emulsión.

## 3. MATERIALES

### 3.1. Áridos

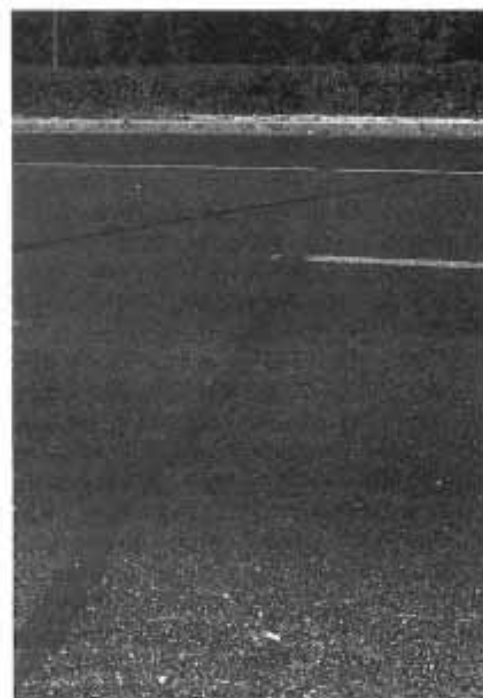
Los áridos a utilizar deben cumplir las especificaciones que se exigen para las mismas categorías de tráfico de proyecto a las bases de grava-cemento.



*Fratasado mecánico con «helicóptero» para generación de textura superficial*



*Tratamiento de una fisura mediante punteado.*



*Textura superficial obtenida con «helicóptero» (pavimento para tráfico ligero) y juntas serradas.*

Para evitar riesgos de segregación y obtener una mejor calidad superficial, se recomienda que el tamaño máximo sea de 20 mm., e incluso de 16 mm. Al mismo tiempo se facilita el mezclado del material. No obstante, en las aplicaciones para tráficos ligeros realizadas en la provincia de Barcelona, se ha llegado a utilizar un tamaño máximo de 38 mm. sin graves problemas; pero hay que tener en cuenta que en estas obras el pavimento se suele terminar, como ya se ha mencionado, con un fratasado con

helicóptero que puede rellenar las zonas con segregaciones superficiales. En una línea similar, en la construcción de presas con hormigón compactado, en donde los problemas de regularidad superficial son secundarios, se han llegado a utilizar áridos con un tamaño máximo de 76 mm. (3 pulgadas).

La granulometría de los áridos ha de ser continua. La Instrucción de Autovías fija para los tamaños máximos de 16 y 20 mm. los husos dados en la tabla 1. Se han incluido en las mismas el con-



glomerante, a fin de limitar también el contenido total de finos: un exceso de los mismos suele provocar dificultades en la compactación, con «colchoneo» del material.

Si una curva granulométrica está comprendida dentro del huso correspondiente a su tamaño máximo, no hay que interpretar «a priori» que sea correcta. La curva más idónea deberá establecerse mediante ensayos de laboratorio.

En general, cuando se trate de refuerzos bajo circulación, debe tenderse a usar curvas en la zona inferior del huso menos ricas en finos, con objeto de limitar el riesgo de colchoneo durante la puesta en obra y la sensibilidad al tráfico en caso de lluvias poco tiempo después de terminar la colocación.

El árido se suministrará al menos en dos tamaños: arena 0/5 mm. y gravilla 5/16 ó 5/20 mm., según tamaño máximo.

Respecto al uso de áridos rodados, hay que tener en cuenta que una de las principales ventajas del hormigón compactado, sobre todo cuando se utiliza en obras de refuerzo, es su posibilidad de apertura inmediata al tráfico. Ello requiere que el esqueleto mineral formado por los áridos compactados tenga una estabilidad o «capacidad de soporte inmediato» suficientemente alta... Suele ser necesario que al menos los 2/3 de los áridos procedan de machaqueo para obtener un valor adecuado de dicha capacidad soporte. Esta puede medirse sometiendo las probetas recién compactadas con la densidad mínima exigida en obra (normalmente el 97% del Proctor modificado) a un ensayo de penetración con la prensa CBR, pero sin disponer sobrecarga anular y sin efectuar imbibición. la proporción mínima de elementos triturados en los áridos debe establecerse de forma que el índice obtenido de esta forma no sea inferior a sesenta y cinco (65).

## 3.2. Conglomerados

Los cementos más apropiados para su uso en capas de firme de carreteras son aquellos con un bajo calor de hidratación, poca retracción y elevadas resistencias a largo plazo que contrarresten los fenómenos de fatiga. Los cementos que mejor cumplen estas exi-

gencias son los que tienen elevados contenidos de adiciones activas (cementos mixtos tipo V o cementos de horno alto tipo III). La Norma UNE 80-301-85, al admitir una relación entre las resistencias a 7 y 28 días menor que la especificada en el Pliego RC-75, ha favorecido el desarrollo de estos tipos de cementos, con los que era difícil cumplir las exigencias de dicho Pliego.

Sin embargo, la citada Norma es relativamente reciente, por lo que las circunstancias anteriores a su aparición propiciaron la recomposición en plantas de cementos especiales mediante la mezcla de cementos Portland P-450 (los P-350 prácticamente no se fabrican en España) y cenizas volantes. Esta práctica no resulta aconsejable frente a la opción de realizar dicha mezcla en fábrica, por las siguientes razones:

- Falta de normativa oficial sobre cenizas volantes y, por lo tanto, el producto debe ser controlado en laboratorio antes de su uso.
- Comportamientos distintos de las cenizas con diferentes cementos (finuras, composición de clinker, etc...) lo que obliga a ensayos previos que, como hemos comentado, deben ser al menos a 90 días, lo que demora mucho los estudios.
- Complicación en obra al tener que usar dos materiales pulverulentos. Si las cenizas se usan en seco, es preciso duplicar el número de silos, unos para cemento y los otros para cenizas.
- La falta de instalaciones adecuadas en un gran número de térmicas, hace que el suministro a obra se realice muchas veces a altas temperaturas, lo que tiene efectos contrarios a los

finos que se buscan (temperaturas bajas del hormigón durante su fraguado). Si el suministro se realiza con cenizas húmedas (sólo las silicoaluminosas), hay que colocar en las tolvas dispositivos especiales antihóvedas, trituradoras de terrores, etc...

- La homogeneización es peor que la que se logra en las fábricas de cemento.

En esta línea, la Instrucción de Autovías recomienda que en caso de utilizar como conglomerante una mezcla de cemento y cenizas volantes, ésta se efectúe previamente a su suministro en obra, debiendo fijarse además las proporciones relativas de ambos componentes mediante un estudio de laboratorio.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, puede establecerse el siguiente orden de preferencia en cuanto a los conglomerantes a utilizar en un hormigón compactado:

- Cementos mixtos tipo V, obtenidos mediante molturación conjunta de clinker Portland y adiciones activas. A las ventajas derivadas de su homogeneidad unen las de un mayor aprovechamiento de las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes, en caso de utilizarse éstas, al liberarse las partículas contenidas dentro de las cenosferas y aumentar así la superficie específica del conjunto.
- Cementos puzolánicos (tipo IV) o de horno alto (tipo III).
- Mezcla en fábrica de cemento y cenizas volantes.
- Cementos Portland con adiciones tipo II.

**TABLA 1**

**Husos granulométricos del hormigón compactado (incluido el conglomerante), para distintos tamaños máximos de árido.**

TAMIZ UNE	TAMAÑO MÁXIMO	
	16 mm.	20 mm.
25 .....	—	100
20 .....	100	85-100
16 .....	88-100	75-100
10 .....	70- 87	60- 83
5 .....	50- 70	42- 63
2 .....	35- 50	30- 47
0,40 .....	18- 30	16- 27
0,08 .....	10- 20	9- 19



— Mezclas en planta de cementos tipo I o como máximo tipo II, y cenizas volantes. Las proporciones de éstas últimas deben limitarse, de forma que el porcentaje de cal aportado por el cemento sea suficiente para poder movilizar totalmente el poder puzolánico de las cenizas. Si se emplean cementos tipo I, no se recomienda que la proporción de cenizas sea superior al 40%, valor que debe reducirse a un 33% si se utiliza un cemento tipo II.

En caso de utilizarse cenizas volantes, éstas deberán ser preferentemente de tipo silicoaluminoso. La sustitución de una parte del cemento por cenizas sulfocálcicas, con un elevado contenido de cal libre, puede originar problemas de expansiones, como las que se han presentado en alguna realización española (túnel del Cadi). Por ello, en caso de considerarse la posibilidad de su empleo, deben realizarse previamente ensayos mediante las agujas de le Chatelier, incluso en caliente.

En cualquier caso, las cenizas deben tener características constantes a lo largo de la obra, de forma que éstas se correspondan con las de las utilizadas en las pruebas de laboratorio.

Además de esta constancia de propiedades, la Instrucción española de Autovías impone las siguientes prescripciones a las cenizas volantes de tipo silicoaluminoso:

- Contenido de inquemados inferior al 6%.
- Superficie específica Blaine superior a 2.000 cm.<sup>2</sup>/gramo.
- Cernido por el tamiz 400 µg. UNE no inferior al 55%.

Estas especificaciones son bastante similares a las impuestas en la normativa francesa a las cenizas de las mezclas conocidas como gravacéniza, que en cierto modo pueden considerarse como materiales intermedios entre los hormigones compactados y las gravacementos. Un contenido de inquemados importante se traduce en un descenso acusado de las resistencias; mientras que se han encontrado buenas correlaciones entre éstas últimas y el cernido por el tamiz de 40 µm., creciendo al aumentar éste.

Si el contenido de CaO libre de las cenizas silicoaluminosas es inferior al 1%, puede admitirse su empleo en húmedo, forma en la que frecuentemente vienen de la central térmica; si bien en general debe limitarse el porcentaje de humedad con respecto al peso de materiales secos a un 20%. Las cenizas se almacenan entonces formando acopios y se dosifican mediante tolva. Si por el contrario dicho contenido de CaO libre es superior al 1% o bien las cenizas son de tipo sulfocálcico, deben manejarse en seco, para evitar problemas de fraguado: el almacenamiento del material se efectúa en silos.

El contenido de conglomerantes en los hormigones compactados suele oscilar entre el 10% (mínimo admitido por la Instrucción de Autovías) y el 14% en peso del total de materiales secos (230 a 330 kg/m<sup>3</sup>). En las últimas realizaciones catalanas para vías de bajo tráfico, se han empleado un total de 260 kg/m<sup>3</sup> de conglomerante, compuesto por un 65% de cemento P-450 y un 35% de cenizas sulfocálcicas de la Central de Cercs. Por el contrario, en la mayoría de las obras en la red principal, los conte-

nidos de conglomerante han variado entre 300 y 350 kg/m<sup>3</sup>.

Como ejemplo de la influencia del contenido de conglomerante, en la tabla 2 se dan los resultados obtenidos en unos ensayos de laboratorio realizados previamente a la construcción del refuerzo de Alcañiz. El conglomerante utilizado consistió en un cemento tipo V, obtenido mediante molienda conjunta de un 47,5% de clinker, un 2,5% de yeso y un 50% de ceniza volante silicoaluminosa.

Aunque, como se ha mencionado, los valores de la tabla corresponden a un ejemplo concreto, reflejan algunas tendencias generales de los hormigones compactados fabricados con cementos tipo V, entre las que pueden destacarse las siguientes:

- Los incrementos de resistencias de 28 a 90 días son muy notables (en el ejemplo, del orden de un 30% como media), por lo que el exigir en estos materiales ensayos a 28 días supone infraestimar sus posibilidades. Estas ganancias relativas de resistencias aumentan al crecer el contenido de conglomerante.
- El incremento de dicho contenido de conglomerante de un 10 a un 13% supone asimismo un fuerte incremento de las resistencias (más de un 100% en el ejemplo); y ello, a cualquier edad de ensayo.

### 3.3. Humedad y energía de compactación

La determinación de la humedad se realiza con objeto de conseguir la mezcla que permita obtener la máxima densidad seca con la energía de compactación del ensayo que se utilice, y que suele ser similar a la del ensayo Proctor modificado. Además de este último método, se ha empleado también el consistómetro VeBe, como ya se ha mencionado, que presenta la ventaja de no provocar roturas en los áridos si éstos no son de gran dureza; por el contrario, tanto la maza Proctor como el martillo vibrante Kango pueden llegar a alterar la granulometría del material. Para determinar la curva humedad-densidad con el consistómetro VeBe, se complementa este último con un peso de 20 libras (unos 9 kg.) que se coloca reposando directamente sobre el hormigón

**TABLA 2**

**Evolución de las resistencias con la edad al hormigón compactado (refuerzo de Alcañiz) e influencia del contenido de conglomerante**

Contenido de cemento tipo V, con 50 % ceniza (%)	RESIST. A TRACCIÓN INDIRECTA, MPa		
	A 7 días	A 28 días	A 90 días
10	1,1	1,8	2,2
11	1,3	2,4	3,0
12	1,9	2,9	3,5
13	2,3	3,5	4,6
14	2,6	3,6	4,9
15	2,7	3,6	5,2



TABLA 3

Plazos mínimos de trabajabilidad del hormigón compactado en función del tipo de obra a realizar

**Nuevas obras o refuerzos sin circulación:**

1. Ejecución por ancho completo sin necesidad de refino posterior .....	5 horas
2. Ejecución por semianchos .....	7 horas
3. Ejecución por ancho completo con refino posterior .....	7 horas

**Refuerzos bajo circulación:**

9 horas

una cantidad de agua constante, las variaciones de resistencia entre el 95% de la densidad OPM y el 100% de densidad OPM, suelen obedecer a una ley lineal entre el 75% de la resistencia y el 100%. Por esta razón, suele exigirse una densidad mínima del 97% OPM, la cual produce una baja de resistencia del orden del 15% con respecto a la OPM.

En centrales de fabricación continuas bien controladas, la variación de la humedad en relación con la media suele ser de  $\pm 0,8\%$ . Las pérdidas de agua entre fabricación, extendido y compactación dependen mucho de las condiciones ambientales y de las distancias de transporte, pero un mínimo suele ser el 0,4%. Si la curva de resistencias obtenidas fuese simétrica, convendría tener un abanico centrado en obra, pero al ser ligeramente asimétrica, con menor bajada de resistencia al disminuir la humedad, conviene fijar una humedad de fabricación más baja, por ejemplo OPM-0,2%, lo que produciría un abanico máximo de:

$$\begin{aligned} (OPM - 0,2\%) \pm 0,8\% &= +0,6\% \text{ OPM} + 0,6\% \\ &= -0,4\% \text{ OPM} - 1,4\% \end{aligned}$$

Por lo tanto, se recomienda que los estudios de resistencia se hagan para densidad constante del 97% OPM y humedades de (OPM - 1%), (OPM), (OPM + 0,5%). De esta forma se obtendrá el contenido de cemento recomendable y la mejora curva granulométrica.

### 3.4. Aditivos: plastificantes y retardadores de fraguado

Pueden utilizarse aditivos que mejoren ciertas características de la mezcla. Así, mediante el empleo de plastifican-

tes es posible conseguir las densidades requeridas con menores contenidos de agua, lo cual se traduce en un aumento de las resistencias.

Otro tipo de aditivos cuyo empleo suele ser imprescindible, salvo si la temperatura de puesta en obra es baja, son los retardadores de fraguado para aumentar el plazo de trabajabilidad del material.

Se entiende por trabajabilidad de un hormigón compactado su facultad de conservar durante un periodo de tiempo su aptitud para la compactación.

A medida que se desarrolla el fraguado del material, el hormigón compactado pierde progresivamente su trabajabilidad. El agua libre se combina con el conglomerante, perdiendo su papel de lubricante; mientras que los enlaces conglomerante-árido que empiezan a desarrollarse rigidizan de forma paulatina y el material. El plazo de trabajabilidad es el intervalo, contado a partir de la mezcla de los componentes, durante el cual, al no haber comenzado o ser muy débil el fraguado del conglomerante, se puede proceder al extendido y compactación del material.

Si estas operaciones se realizan cuando el fraguado ya se ha iniciado, no sólo se dificultan las mismas, sino que además las resistencias del material pueden verse seriamente perjudicadas, al destruirse los enlaces entre los áridos. Esta ha sido la causa de muchos fracasos en firmes con bases de gravacemento, viéndose agravado el deterioro por el paso del tráfico de obra sobre las mismas. Por ello, no es extraño que se hay llegado a afirmar que «muchas gravacementos han nacido muertas». La experiencia adquirida en este sentido con dichos materiales ha sido tras-

sin compactar. Al accionar el consistómetro, el material queda sometido a una auténtica vibrocompresión. El ensayo se detiene cuando el hormigón ya no asienta más, viéndose a través del plato de plástico transparente del consistómetro una superficie uniformemente cerrada. Calculando entonces tanto el peso del hormigón como el volumen ocupado por el mismo (por ejemplo, mediante la toma de las medidas geométricas que permitan su evaluación o bien determinando con agua el volumen del recipiente cilíndrico no ocupado por el hormigón) puede obtenerse la densidad del material, y con diferentes contenidos de agua, la curva humedad-densidad y el máximo de la misma.

La humedad óptima para la obtención de la densidad máxima es superior a la que se necesita para la hidratación del cemento, que es del orden de un 3 a un 4%, mientras que dicha humedad óptima suele estar comprendida, al igual que en una gravacemento, entre un 4 y un 7%.

Uno de los inconvenientes de los hormigones compactados es su sensibilidad frente a las variaciones de humedad y a la compactación obtenidas. Un exceso o defecto de agua, así como una densidad insuficiente, disminuyen notablemente las resistencias mecánicas. Por otra parte, una falta de humedad suele llevar consigo riesgos de segregación y de aparición de zonas localizadas con defectos de fraguado, así como dificultades de compactación; mientras que un exceso de agua se traduce en una regularidad superficial defectuosa (colchoneo del material al ser compactado). Estos defectos pueden manifestarse incluso con variaciones de  $\pm 0,5\%$  de la humedad con respecto a la óptima.

Por todo ello es importante estudiar la sensibilidad de la mezcla al contenido de agua (exceso o falta) y a la energía de compactación.

Para ello deben confeccionarse probetas a densidades prefijadas (por ejemplo, 90, 95,97 y 100% de la OPM), y cada una de ellas con la humedad del OPM y  $\pm 0,5$  y 1,0%. De esta forma, se puede fijar el límite de densidad a conseguir en obra, teniendo limitada la variación de resistencia que puede producirse por inevitables desviaciones.

Aunque depende de las mezclas, para



plantada positivamente a los hormigones compactados.

En la Instrucción de Firms de Autovías se prescriben los plazos mínimos de trabajabilidad del hormigón compactado que figuran en la tabla 3.

La determinación del plazo de trabajabilidad es complicada. Los Laboratorios de Ponts et Chaussées franceses han desarrollado un método consistente en medir el tiempo de propagación del sonido a lo largo del eje longitudinal de una probeta de material recién compactado. Al irse rigidizando la probeta, la velocidad de paso del sonido va aumentando. Se considera como plazo de trabajabilidad el periodo en el que el tiempo de propagación de los ultrasonidos, determinado mediante transductores fijados a las bases de la probeta, disminuye hasta un 60% del inicial.

El plazo de trabajabilidad varía con la temperatura a la que se efectúan los ensayos, por lo que éstos deben realizarse en una sala a temperatura constante o bien equipada con un recinto termostático. Para establecer la dosificación de producto retardador de fraguado, que normalmente es imprescindible para alcanzar los plazos de trabajabilidad requeridos, habrá que tener en cuenta la temperatura a la que se vayan

a realizar las obras. En la Instrucción de Firms de Autovías se indica que los ensayos deben efectuarse a la temperatura media prevista en obra entre las 11 y las 14 horas. Por ello, durante la ejecución deberá controlarse la temperatura en el extendido, efectuando en caso necesario los oportunos ajustes en la dosificación del retardador. Esta suele variar entre un 0,5% y un 1% en peso del conglomerante.

## 4. FABRICACION

### 4.1. Tipos de centrales utilizables

Pueden utilizarse tanto las centrales continuas empleadas en la fabricación de gravacemento como las centrales clásicas discontinuas para hormigón; por razones de rendimiento son más usuales las primeras. Puede ser de interés mencionar el ejemplo del refuerzo de Santiponce (Sevilla), en donde los componentes se dosifican en central, pero el amasado se realizaba en camiones hormigonera. Se tienen asimismo referencias de la utilización de este sistema en Estados Unidos.

Si se emplean centrales continuas de gravacemento hay que adaptar los sis-

temas de dosificación del conglomerante, limitados generalmente a porcentajes del 6% como máximo, mientras que en los hormigones, compactados son del orden del doble o el triple. Es aconsejable que estas centrales estén dotadas de sistema ponderal para la dosificación del cemento, así como de las cenizas en caso de utilizarse. Para las obras de autovías, la Instrucción española prescribe la obligatoriedad de este control.

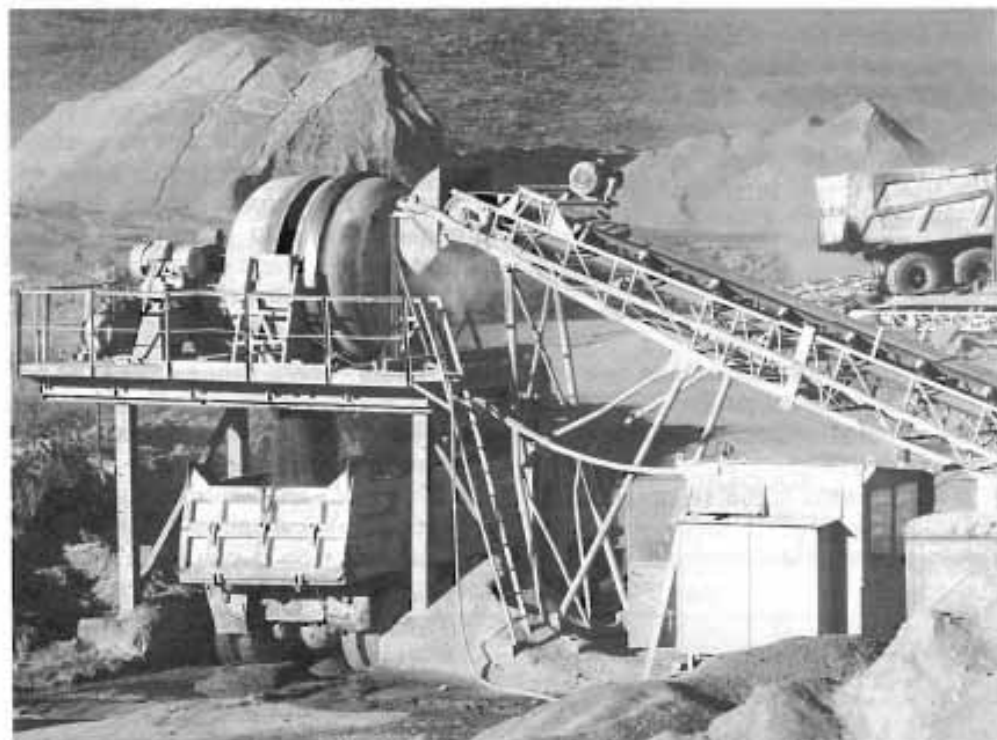
Conviene recordar a este respecto que en Francia las centrales de dosificación volumétrica sólo pueden utilizarse en obras con un tráfico T3 y con volumen de obra inferior a 10.000 toneladas de material tratado. El dispositivo para el control en peso del cemento es fácilmente instalable y puede consistir en una cinta en peso del cemento es fácilmente instalable y puede consistir en una cinta dotada de un transductor de pesada y un medidor de velocidad; un microprocesador efectúa la integración y controla las válvulas de alimentación y la velocidad de las cintas.

En obras de autovías el agua añadida deberá controlarse mediante un caudalímetro y un totalizador con indicador en la cabina de mando de la central.

### 4.2. Acopios de materiales. Silos de materiales pulverulentos

En los acopios y manipulación de áridos deberán observarse las precauciones necesarias para impedir segregaciones, degradaciones, contaminaciones o mezclas de materiales de distintos tamaños. Para garantizar la homogeneidad del material puesto en obra, la Instrucción de Autovías prescribe que antes de iniciarse la fabricación deberá estar acopiado al menos un 50 % del árido necesario para la totalidad del hormigón compactado previsto. En el caso de utilizarse cenizas volantes suministradas en húmedo, se exige igualmente que esté acopiado al menos un 5 % del total, recomendándose proteger los acopios con toldos.

Si se usan centrales continuas de gravacemento hay que tener en cuenta, como se ha mencionado, que la dosificación del cemento en un hormigón compactado es de dos a tres veces superior a la de una gravacemento. Por ello, si no se quiere disminuir la capaci-



Fabricación de hormigón compactado con central discontinua (túnel del Cadi).





Descarga de hormigón compactado transportado en camión volquete.



Extendido con motoniveladora.

dad de producción diaria, es preciso aumentar el número de silos disponibles. Para su cálculo hay que tener en cuenta tanto la regularidad del suministro como la capacidad de los vehículos que la realizan.

En el caso de utilizar cenizas volantes secas, habrá que prever silos distintos de los del cemento y una instalación de dosificación, asimismo independiente.

Si las cenizas se suministran húmedas, habrá que disponer en las tolvas de las mismas al menos dos vibradores,

uno en la parte baja y otro en la parte alta, para solucionar los problemas tales como la formación de bóvedas que dificulten el vaciado. Asimismo, antes de la tolva dosificadora, habrá que instalar un molino para la rotura de los terrones que se puedan formar.

## 5. PUESTA EN OBRA

### 5.1. Transporte y extendido

El transporte se realiza en camiones volquete. Hay que cuidar la segrega-

ción, para lo cual la carga de los camiones debe realizarse desde tolvas intermedias, con altura de caída lo más limitada posible. En condiciones climáticas adversas, puede ser necesario utilizar lonas para proteger el hormigón de la lluvia o de la desecación durante el transporte.

El extendido del material puede realizarse mediante motoniveladora, o bien con extendedora de las usadas para gravacemento o para aglomerado asfáltico.

En el túnel del Cadi, el extendido se realizó en dos capas: los 10 cm. inferiores, con motoniveladora; y el resto, con una terminadora de aglomerado. Se utilizó este sistema porque, debido a las irregularidades de la excavación, había lugares en los que el espesor podía alcanzar hasta 30 cm., con lo que no era posible construirlo en una sola capa con la terminadora. En Norteamérica este mismo sistema en dos capas se ha empleado en la construcción de algunos pavimentos para vehículos muy pesados, con espesores cercanos en ocasiones a los 40 cm.

La motoniveladora puede estar indicada para trazados de geometría compleja (urbanizaciones, aparcamientos), para carreteras en las que la exigencia de regularidad superficial no sea muy alta (carreteras secundarias) o carreteras con capa de rodadura de aglomerado. En otros casos, es recomendable el uso de extendedoras. Además, para espesores fuertes ( $> 22$  cm.) son preferibles las modernas extendedoras provistas de pisonos (tampers) y reglas vibrantes que producen una precompactación importante, lo cual permite conseguir un buen nivel de regularidad superficial.

Si se utiliza motoniveladora, el refinado posterior es imprescindible para conseguir un buen acabado. Por tanto, para evitar las aportaciones en capa delgada, que no tienen buena adherencia y producen problemas, el hormigón debe extenderse con espesor superabundante (después de una primera compactación la rasante debe quedar 1 ó 2 cm. por encima de la teórica), refinándolo a base de eliminar siempre material, que puede reutilizarse si el plazo de trabajabilidad es suficiente.

A fin de evitar la formación de juntas longitudinales, la mezcla debe exten-





Compactación: rodillo liso vibrante.

derse por anchos completos, siempre que ello sea posible. En caso contrario, deberá obtenerse el ancho total dentro del plazo de trabajabilidad del primer material colocado en obra. si no se emplean retardadores de fraguado, no debe haber más de una hora de diferencia entre los instantes de las respectivas extensiones de dos franjas contiguas.

## 5.2. Compactación-Bordes-Refino

La operación de compactación debe realizarse de forma que se garantice una densidad media de la capa no inferior al 95%. Con dicho objeto es conveniente la construcción previa de un tramo de ensayo a fin de comprobar el número de pasadas necesarias del equipo de compactación. en las mediciones individuales para la determinación de los valores anteriores (no menos de 20) no deberán obtenerse valores dos puntos porcentuales por debajo de los indicados. Para los casos habituales puede usarse un equipo compuesto de un rodillo liso vibrante pesado (carga estática sobre la generatriz no inferior a 30 kg/cm.) y un compactador de neumáticos pesado (carga por rueda no inferior a tres toneladas, con presión de inflado no inferior a 8 Kp/cm<sup>2</sup>), para cerrar la superficie. En la obra de Santiponce se

utilizó con buenos resultados un compactador pesado mixto, con un rodillo vibrante y cinco neumáticos en el eje trasero.

El orden de intervención de los equipos de compactación debe ser: en primer lugar, el rodillo vibrante sin vibración para no estropear la calidad de la regularidad superficial; a continuación el rodillo con vibración, finalizando con el compactador de neumáticos. Un número de pasadas frecuente es del orden de 8 de rodillo vibrante y de 15 del de neumáticos.

Es aconsejable realizar el control de densidad por medio de gamma-densitómetro, aunque también pueden utilizarse los sistemas tradicionales.

En caso de que se considere necesario efectuar un refino (sistema que hasta el momento parece proporcionar los mejores resultados en cuanto a regularidad superficial), éste debe realizarse después de obtener una densidad del orden del 95% OPM. Una vez retirados todos los productos procedentes del refino, se prosigue la compactación (puede ser necesaria una humectación previa).

Durante la operación de compactación hay que mantener húmeda la su-

perficie mediante riego con agua finalmente pulverizada que contrarreste la evaporación superficial. También es aconsejable humedecer la base antes de extender el hormigón. Para conseguir buenos resultados en la compactación, la capacidad de soporte de la base tiene que ser buena.

La compactación de los bordes es un punto sensible. Los mejores resultados se consiguen si previamente existe una contención lateral, por ejemplo, mediante bordillos colocados. Si no es este el caso, se recomienda extender previamente el material del arcén y posteriormente compactar conjuntamente. Si se está extendiendo por semianchos, se recomienda dejar sin compactar, en la primera banda, un cordón de 40 ó 50 cm. de ancho para que actúe de contención lateral, el cual se compactará conjuntamente con la segunda semibanda.

En el caso de carreteras de poco tráfico, con capas de hormigón seco más delgadas, por ejemplo se realiza más fácilmente. En Cataluña se han conseguido buenos resultados con rodillo vibrante, sin ser necesario el empleo de compactadores de neumáticos, por el sistema de terminación superficial utilizado.

## 5.3. Ejecución de juntas

### 5.3.1. Juntas transversales

Ya se ha comentado previamente que la práctica habitual es no cortar las juntas transversales, dejando que el hormigón compactado se fisure libremente. Las juntas de fin de jornada deben realizarse dejando el canto vertical. Idéntica precaución debe observarse en el caso de que haya que disponer una junta de hormigonado, por interrumpirse el proceso constructivo durante un tiempo superior al plazo de trabajabilidad de la mezcla (dos horas si no se utilizan retardadores de fraguado).

Si por efecto estético se quieren disponer juntas, éstas se serrarán a distancias entre 10 y 15 metros. La edad a la que hay que efectuar el corte no suele ser crítica, pudiendo serrarse en la práctica a las 48 horas. En algunas obras se ha observado incluso que la primera fisura ha aparecido en un plazo de 15 a 30 días después de la ejecución, dependiendo de la temperatura y del clima.





Compactación: compactador de neumáticos.



Cordon central de material sin compactar en la union de semibandas de hormigonado.

## 5.3.2. Juntas longitudinales

Debe organizarse la obra para evitar juntas longitudinales. Si la extensión se realiza por medias calzadas, habrá que ejecutar la segunda durante el tiempo de manejabilidad de la primera calzada. Debe usarse un retardador en caso necesario.

## 5.4. Curado y protección superficial

La superficie del hormigón seco tiene que protegerse de la desecación, puesto que debe asegurarse una buena capa-

cidad de adherencia de la capa de rodadura (especialmente en el caso de tratamientos superficiales). A tal efecto, debe mantenerse constantemente húmeda mediante pulverización fina de agua, que no produzca ningún encharcamiento, el cual daría lugar a problemas en la compactación. Al final de las operaciones de extendido y compactación hay que extender un tratamiento de curado.

Si el tráfico va a darse inmediatamente, este tratamiento debe consistir en un riego con emulsión que no sea ácida (con el mayor pH posible para no atacar al cemento), en proporción de 600

g./m.<sup>2</sup> de betún residual; y posteriormente extensión, en un plazo máximo de cinco minutos, de arena 4/6 mm. y dotación de 4 a 6 litros/m.<sup>2</sup> (fig. 25). En los casos en que el tráfico no vaya a ser dado de inmediato, se han utilizado como productos de curado unos latex con polímeros que, aparte de preservar la humedad, han reaccionado con el cemento de los milímetros superficiales, produciendo unos morteros más duros y resistentes. Esta solución es preferible a las emulsiones, pero no puede utilizarse si se da tráfico inmediato. La dotación usual es del orden de 400 g/m.<sup>2</sup>

Las operaciones anteriores deberán realizarse antes de transcurridas doce horas desde el final de la compactación. Este plazo ha de ser reducido con tiempo cálido y seco.

## 5.5. Limitaciones a la ejecución Lluvias. Heladas.

La compactación del hormigón seco es muy sensible al agua. Un exceso de agua, producido por lluvia, puede producir colchoneo, aparte del lavado superficial. Incluso una lluvia fuerte recién abierto al tráfico, puede ser nociva. Por estas razones no debe ejecutarse esta unidad de obra con lluvia.

Si el cemento utilizado es un cemento lento (con fuertes proporciones de cenizas volantes o escorias) el periodo durante el cual el material es sensible al hielo aumenta.

Por esta razón se recomienda no ejecutar esta unidad si se prevén heladas durante el periodo de endurecimiento, salvo que se hayan utilizado cementos rápidos, lo cual no parece en principio aconsejable.

## 5.6. Control

El esfuerzo mayor debe ponerse en los controles previos de equipos y materiales, y durante la obra en los sistemas de información en tiempo real (registros continuos de pesadas de áridos y cemento, humedad, etc.). De esta forma es posible la intervención rápida si se producen anomalías. Los controles durante la ejecución se centran básicamente en la comprobación en fresco de espesores y de densidades. En lo que se refiere a los espesores, la Instruc-





Extensión de arena para protección del riego de curado.

ción de Autovías prescribe su control cada diez metros de extendido, sobre el material sin compactar, mediante hincas de un clavo con escala, teniendo en cuenta la disminución que sufrirá el material al compactarse. Si para una mayor precisión se efectúan los controles sobre el material compactado, deberá recurrirse a métodos altimétricos.

Para el control de la densidad se recomienda el empleo de sondas nucleares, efectuándose las determinaciones en emplazamientos aleatorios, con unas frecuencias mínimas de una medida por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie de capa. Puede emplearse también el método de la arena para la comprobación de la densidad «in situ», aunque este sistema es considerablemente más lento. A ser posible deberán instalarse en los compactadores equipos gráficos de registro continuo, para controlar su velocidad de avance, la frecuencia de vibración, el tiempo de trabajo y la distancia recorrida.

Asimismo deberán efectuarse medidas de la humedad «in situ» en emplazamientos aleatorios, en correspondencia con las efectuadas en el control de fabricación. En general, los contenidos de humedad deberán estar comprendidos entre la óptima y ésta disminuida en

dos puntos porcentuales. Las zonas en donde manifiestamente se hubiera producido un incidente se corregirán debidamente.

Finalmente debe controlarse, con regla móvil de 3 m. o con otro dispositivo (viagrafo, APL) la regularidad superficial. Este es uno de los puntos que pueden ser críticos de la tecnología de hormigones secos. Si los resultados no son buenos, hay que extender una capa de aglomerado (normalmente basta con 4 cm.). Los mejores resultados de regularidad superficial se han obtenido extendiendo la base con hilo y el hormigón seco con extendidora con patin, sobre todo, si se utilizaron equipos modernos con doble tamper, que pueden asegurar una precompactación del orden del 94 ó 95% de la densidad Proctor modificada, con lo que el rodillo apenas provoca asentamientos de la superficie.

## 6. ACABADO SUPERFICIAL

Salvo en los casos de pavimentos en los que se vaya a circular a baja velocidad, (superficies portuarias o industriales; o bien urbanizaciones residenciales o vías urbanas de baja intensidad, en las que ya se ha comentado la posibili-

dad del fratasado mecánico), la práctica más usual es la extensión de una capa de rodadura.

Por problemas de coste, la solución más empleada es un tratamiento superficial monocapa doble engravillado con betunes fluxados. Si bien requiere una ejecución cuidadosa, es la que proporciona una rugosidad más elevada y unas mejores cualidades drenantes. Además, conduce a economías apreciables de ligantes y puede ser empleada con tráficos fuertes. Una dosificación usual es la siguiente:

• Betún fluxado .....	1,35 kg/m <sup>2</sup>
• Gravilla 13/7 .....	8 l/m <sup>2</sup>
• Gravilla 6/3 .....	5 l/m <sup>2</sup>

En los casos en que la regularidad superficial no se puede conseguir con los medios de extendido, conviene acabar con una capa delgada de aglomerado asfáltico que corrija los defectos de regularidad. Los mejores resultados se consiguen extendiendo esta capa después de unas semanas de tráfico.

(\*) Carlos Jofré, Rafael Fernández y Alejandro Josa son ingenieros de Caminos del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).