

Hormigón compactado con rodillo^(*)

Por FRANCISCO ORTEGA SANTOS

El hormigón compactado con rodillo es un material de notable actualidad, como viene demostrando su empleo en importantes obras. El artículo que se presenta a continuación, galardonado con el Primer Premio HALESA 1988, ofrece una panorámica completa de las características y método de empleo de este tipo de hormigones en diferentes aplicaciones.

1. GENERALIDADES

1.1. Concepto

Durante muchos años, el hoy llamado HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO (HCR), fue usado en la subbase de firmes de carreteras y pavimentos en aeropuertos. Desde finales de la década de los cuarenta ha sido empleado frecuentemente en el Reino Unido, con la denominación de hormigón pobre, como una base de 150 a 250 mm. de espesor bajo superficies bituminosas.

El éxito del hormigón compactado en estos usos ha sido atribuido a una serie de factores; principalmente a que es un material sencillo de producir y colocar, así como que no requiere el empleo de un equipo de construcción específico, lo que supone, en definitiva, una economía considerable. Las dosificaciones para trabajos de pavimentación tienen normalmente un bajo contenido de cemento, alrededor de 110 a 120 kg. por metro cúbico y conllevan el empleo de áridos de calidad como los usados en hormigón convencional. El contenido de agua por su parte, es escogido de tal forma que se produzca un hormigón de asiento no medible por los métodos habituales, con el cual pueda ser compactado con rodillo.

El primer hormigón pobre colocado en presas fue el de la presa de Alpe Gera en Italia entre 1961 y 1964. A pesar de que no se compactó con rodillo sino con una batería de vibradores colocados en la parte trasera de una máquina que los desplazaba, supuso el nacimiento de un nuevo método de construcción para presas de hormigones, ya que fue extendido en

capas de 70 cm. de espesor de una manera continua desde un lado del valle hasta el otro (y por tanto dejando a un lado la construcción convencional por bloques monolíticos).

Desde un primer momento la búsqueda de un hormigón con baja fisuración, junto con la necesidad de establecer el empleo de unas mezclas y sistemas de ejecución más económicas, condicionaron de manera determinante las dosificaciones empleadas con esta nueva técnica. Los bajos contenidos en cemento y agua, para la consecución de tales fines llevaron, por necesidades de colocación, a la compactación con rodillo, conjuntándose estos aspectos en lo que hoy denominamos de manera general como HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO.

El origen de este concepto está en las conferencias celebradas en Asilomar, California, en 1970 y 1972.

A partir de entonces se hicieron numerosos estudios y ensayos para llegar a conocer con mayor exactitud las distintas propiedades que exhibía esta nueva concepción en el tratamiento del hormigón.

Los países que con mayor fuerza han desarrollado esta nueva técnica han sido fundamentalmente Estados Unidos y Japón con métodos que, como veremos posteriormente, difieren ligeramente entre sí.

España constituye en estos momentos uno de los países de Europa, en el cual el HCR está teniendo mayor acogida.

1.2. Áridos

El árido ideal para hormigón compactado debería consistir en un cierto tipo de materiales

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1988.

machacados o rodados que cumpliera las siguientes características generales:

- Que resista lo suficiente como para no triturarse bajo la acción del compactado por rodillos vibratorios.
- Que no superen un máximo de contenido de arcilla que daría como resultado un hormigón poco resistente.
- Como árido fino debería emplearse arenas naturales o productos finos de machaqueo con una granulometría continua.
- En cuanto al árido grueso, debe cuidarse el tamaño máximo del mismo.
- Las proporciones óptimas de uno y otro, dependerán de la graduación del árido fino, y serán el resultado de los ensayos previos definidos por distintas normas para cada tipo de obra.
- Si el hormigón presenta signos de segregación debería incrementarse el contenido de finos.
- La granulometría ideal para la demanda mínima de mortero será la que proporcione la máxima densidad del material seco compactado, con la mínima área superficial.

1.3. Conglomerantes

El conglomerante necesario para fabricar hormigón compactado puede estar compuesto por cemento Portland, cemento puzolánico o por una mezcla de estos cementos y de cenizas volantes (u otro material puzolánico). La principal diferencia entre el hormigón compactado y el tradicional estriba en el hecho de que el hormigón compactado requiere el empleo de mayores dosificaciones de cenizas.

Al dosificar las mezclas para mínimos volúmenes de pasta, una función principal de la ceniza volante o de los finos añadidos es ocupar el espacio que de otra manera sería ocupado por cemento puro o agua. Ocupar este espacio con agua produce una reducción de la resistencia del hormigón. Ocuparlo con cemento puro se traduce en problemas derivados del calor de hidratación, además de encarecer la obra. Los ensayos muestran que la actividad

puzolánica (reacción con la cal) continúa durante un dilatado número de años. Así es que las adiciones puzolánicas no solamente ocupan espacio, contribuyendo también al desarrollo de resistencias. Su contribución a la generación de calor varía inversamente con la relación puzolana/cemento, de forma tal que para una determinada resistencia, la mezcla con el mínimo contenido de cemento (cumpliendo la resistencia especificada, presentará el mínimo incremento de temperatura.

1.4. Análisis de propiedades

Resistencia mecánica

La resistencia mecánica del hormigón totalmente consolidado viene influida principalmente por la relación agua/conglomerante. Aún con los bajos contenidos de agua usados en este tipo de hormigones, la ganancia de resistencia al bajar el agua, indica que este componente siempre es suficiente para asegurar una hidratación continuada.

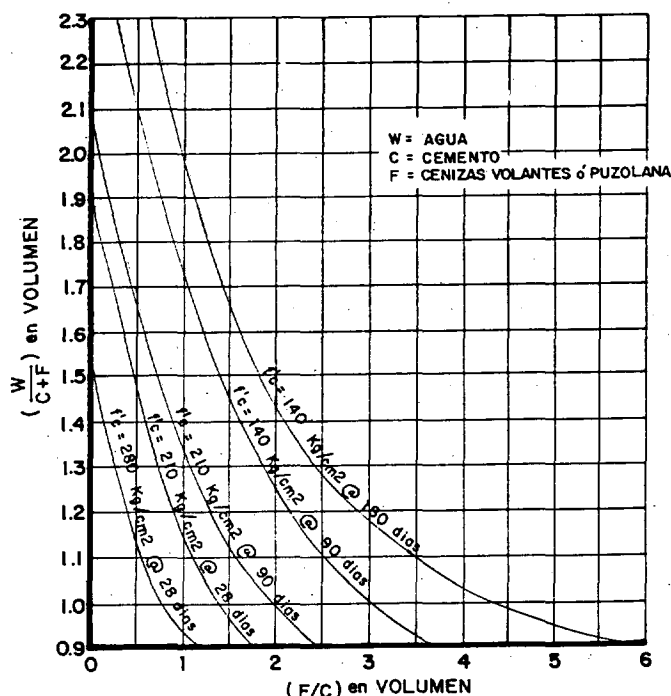
En cuanto a las cenizas volantes, su contribución a la resistencia mecánica no sólo se centra en su acción puzolánica como antes vimos, sino que según Dustan (3), tiene también importancia a cortas edades la acción colmatante de los poros por la ceniza volante, y la acción beneficiosa de éstas al reducir la tendencia a flocularse de las partículas de cemento Portland durante el amasado, cuya consecuencia sería una mala distribución del mismo a través de la pasta.

La contribución del cemento a la resistencia es inicialmente mayor que la de las cenizas, aunque a más edad éstas incluso le superen (4).

Estas consideraciones quedan recogidas en el gráfico de dosificación para iguales resistencias del hormigón, que figura en la página siguiente. En él se da un grado de magnitud de los valores alcanzados por dichas resistencias en el hormigón compactado.

Propiedades elásticas

Los principales factores que afectan a las propiedades elásticas del hormigón son la edad,



CURVAS DE DOSIFICACION PARA IGUAL RESISTENCIA DEL HORMIGON

el tipo de árido y la relación agua/cemento o calidad de la pasta. El módulo elástico del hormigón aumenta con la edad y con el contenido de cemento. La discontinuidad de la pasta, por ser su volumen insuficiente, provocará la aparición de un volumen de huecos elevado, lo cual afectará negativamente al módulo elástico. Ciertos tipos de áridos (cúarcitas, argillitas, etc.) confieren unas características de «fragilidad» al hormigón que se traducen en elevados valores del módulo elástico.

Debe esperarse que con una adecuada dosificación y consolidación del HCR se obtengan valores similares a los del hormigón convencional amasado con el mismo tipo de árido. El aumento en la proporción de áridos que conlleva el HCR, y el consiguiente aumento en la densidad debería aumentar el módulo de elasticidad para un tamaño máximo del árido dado, estando provista la mezcla de suficiente pasta. Si ésta fuese insuficiente, la densidad disminuiría con el aumento de los huecos de aire. Los módulos de elasticidad obtenidos de ensayos adoptan valores, para hormigones con contenido de cemento de 60 kg. por metro cúbico y doble de agua en peso variando de

$0,22 \times 10^7$ kg. por metro cuadrado a tres días hasta $1,81 \times 10^7$ a un año y, para contenidos de 120 kg. de cemento por metro cúbico e igual de agua, desde $0,95 \times 10^7$ hasta $2,36 \times 10^7$ (5).

Consistencia

El hormigón adecuado para compactación por rodillo difiere notablemente en apariencia del hormigón normal de asiento medible con los procedimientos habituales. El esfuerzo vibrante requerido es mucho mayor que el necesario para vibrar hormigón convencional. Para consolidar este tipo de hormigón se puede emplear cualquier método externo de vibración suficiente para obtener la completa consolidación. La densidad máxima alcanzable para una mezcla dada depende del volumen de huecos del árido y del contenido de mortero.

La consistencia del hormigón fresco se mide, cada vez de manera más generalizada, con el consistómetro VeBe modificado. Se trata de añadir una sobrecarga de 9 kg. sobre la carga de 3,4 kg. que tiene el plato del aparato de medida. La consistencia VeBe es el número de segundos que se requieren para consolidar el volumen de hormigón contenido en un cono de Abrams en un recipiente de 241,3 mm. de diámetro.

El consistómetro VeBe se utiliza también para medir la densidad del hormigón compactado por vibrocompresor hasta consolidación total. En Japón se utiliza un consistómetro similar que mide también en segundos y se denomina tiempo VC.

En los gráficos adjuntos podemos observar como al aumentar el tiempo de vibración conseguimos incrementos cada vez menores de la densidad del material, para el mismo contenido de agua.

Tiempo de puesta en obra (Factor de Madurez)

Se entiende por tiempo de puesta en obra de un hormigón compactado, su facultad de conservar durante un período 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 el material. El tiempo de puesta en obra 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. Este tiempo está condicionado por la composición del conglomerante y por la temperatura, definiéndose el llamado Factor de Madurez como el producto de la temperatura por el tiempo.

Si estas operaciones se realizan cuando el fraguado ya se ha iniciado, no solo se dificul-

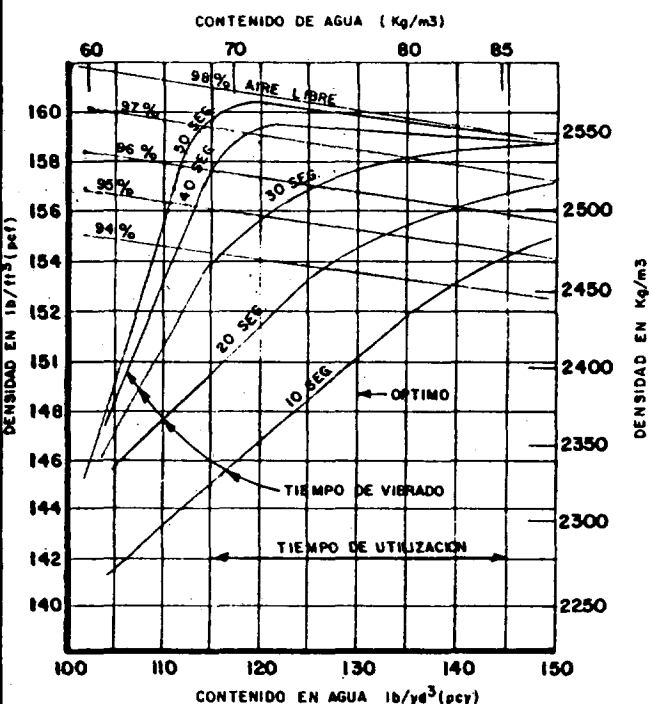
tan las mismas, sino que además las resistencias del material, pueden verse seriamente perjudicadas, al destruirse los enlaces entre los áridos.

Los Factores de Madurez que se presentan con más frecuencia adoptan valores del orden de 150-250 gr. C por hora.

Fluencia y capacidad de deformación

La magnitud de la fluencia es directamente proporcional al volumen de pasta (agua más productos cementicios), contenido en una unidad de volumen de hormigón.

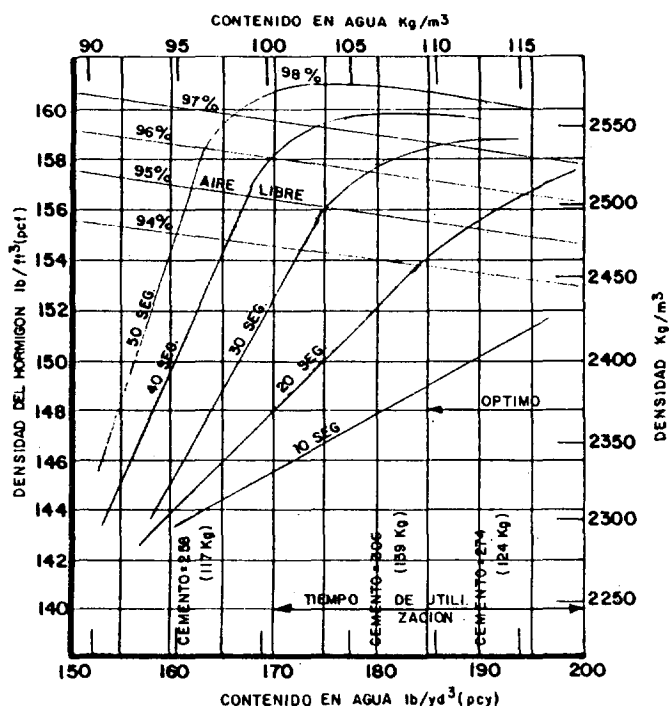
Las mezclas con huecos en la matriz debidos a inadecuados volúmenes de pasta presentarán discontinuidades de la misma que pue-



COMPONENTES	PESO	VOLUMEN
	LBS (Kg)	
1/2" (38 mm) MSA	2556 (1159)	14,5 (0,41)
ARENA	1360 (587)	7,9 (0,22)
CENIZAS VOLANTES	336 (152)	2,34 (0,066)

NOTA: ARIDOS DE MACHAQUEO

EFFECTO DEL TIEMPO DE VIBRACION Y DEL CONTENIDO DE AGUA EN LA DENSIDAD DEL HORMIGON CON CENIZAS VOLANTES



COMPONENTES	PESO	VOLUMEN
	LBS (Kg)	
1/2" (38 mm) MSA	2556 (1159)	14,5 (0,41)
ARENA	1293 (587)	7,51 (0,21)

NOTA: ARIDOS DE MACHAQUEO

EFFECTO DEL TIEMPO DE VIBRACION Y DEL CONTENIDO DE AGUA EN LA DENSIDAD DEL HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND

den contribuir a un incremento de la fluencia bajo carga.

La capacidad de deformación del HCR no debiera, por tanto, diferir de la del hormigón convencional del mismo contenido en material cementicio. Sin embargo, en muchos casos debe esperarse que sea mayor porque, como ya hemos dicho, usualmente se confecciona con cementos de elevado contenido en puzolana natural o artificial. Esta menor capacidad de deformación quedaría compensada por la menor deformación térmica como resultado de emplearse hormigones más pobres y ser colocado en tongadas de poco espesor.

Retracción

El cambio de volumen potencial debido a la pérdida de humedad o retracción de secado, es significativamente bajo en el HCR debido a su menor contenido en agua de amasado frente al de un hormigón convencional. La superficie está sujeta a la desecación, como sucede en todos los hormigones, pero hay también menos pasta en superficie y el mayor volumen de árido restringe más el cambio de volumen. El principal efecto de la desecación superficial sería la microfisuración de la pasta alrededor de las partículas de árido. La retracción de secado resulta también afectada por la relación agua/cemento.

Generalmente, «las puzolanas naturales inducen mayores cambios de volumen autógenos en el hormigón que las cenizas volantes o el cemento Portland puro» (5).

Durabilidad

La durabilidad del hormigón se estima por su resistencia a la meteorización por ciclos hielo-deshielo, el ataque químico y la erosión o desgaste.

En el caso de la meteorización (hielo-deshielo), influye la resistencia a la misma del árido y el contenido de aire ocluido en el hormigón. Este último resulta bajo en el hormigón compactado, por lo que será necesaria una adecuada elección de los áridos para garantizar su durabilidad en lo que a meteorización se refiere. Es preciso insistir en los estudios que vie-

nen realizándose para conseguir ocluir aire en el hormigón compactado.

Estudios realizados con HCR (27), muestran que la resistencia a la erosión se mejora con el empleo de tamaños de árido más pequeño y texturas superficiales suaves.

No existen aún estudios en cuanto a la resistencia a ataques químicos del HCR, pero parece lógico pensar que no diferirán mucho de la del hormigón convencional.

Permeabilidad

La permeabilidad de una masa de hormigón depende en gran medida del aire atrapado en el sistema de huecos. Como la cantidad de pasta es suficiente para minimizar el sistema de huecos, y el grado de compactación, consolida completamente la masa, el HCR es tanto o más impermeable que el hormigón convencional.

Sin embargo, las filtraciones que pueden aparecer por no haberse conseguido una adecuada trabazón en las juntas horizontales, deben ser evitadas tratando que la mezcla cubra las juntas frías proporcionando un exceso de volumen de pasta, y evitando, en la medida de lo posible, el agrietamiento y la desecación.

Resistencias al esfuerzo cortante

Los ensayos realizados hasta la fecha no revelan diferencias significativas frente al hormigón convencional.

Los valores obtenidos en ensayos (5), muestran valores entre 1 y 3 MPa.

2. CARACTERISTICAS ESPECIFICAS DEL HCR EN PRESAS

El término hormigón compactado con rodillo, describe de una manera general al hormigón usado en procesos constructivos que combinan las técnicas más económicas de colocación, con excelentes propiedades mecánicas del hormigón, tales como su resistencia y durabilidad.

En el caso de presas se han hecho numerosos estudios con objeto de alcanzar un óp-

timo en la conjunción de estos factores, lo que ha dado lugar, según los distintos países, a diferentes designaciones para procedimientos análogos: rolled compacted concrete (RCC), rolled compacted dam concrete (RCD), rolled concrete, rolcrete, lean concrete, rolled lean concrete, hormigón compactado con rodillo (HCR), etc.

Los dos términos fundamentales que hoy en día prevalecen son:

- Rolled Compacted Concrete (RCC), desarrollado en USA, y
- Rolled Compacted Dam Concrete (RCD), desarrollado en Japón.

Pasemos pues a describir brevemente cada uno de estos métodos, tratando de completar las características del HCR mencionadas en apartados anteriores, con otras específicas para el empleo de presas.

2.1. Propiedades del HCR en presas

Las cualidades ideales que debe tener el hormigón colocado en obra en capas horizontales por compactación con rodillos vibrantes en presas, son las siguientes:

- Permeabilidad baja.
- Densidad alta.
- Buena unión entre juntas horizontales.
- Buena unión entre el hormigón de paramentos y el hormigón compactado con rodillo vibrante del núcleo, en su caso.
- Retracción pequeña.
- Resistencia a la tracción alta.
- Métodos de control de calidad adecuados y rápidos.
- Facilidad para incorporar otras características del diseño, tales como drenes, juntas, galerías, tuberías de servicio, etc.

Un hormigón que permita conseguir las cualidades anteriores, además de tener la adecuada proporción de árido grueso y de mortero, precisa que éste tenga una alta proporción de pasta con contenidos bajos de cemento y agua. Esto se consigue con la incorporación de un alto contenido de cenizas volantes.

2.2. Construcción de juntas

Juntas horizontales de construcción

El espesor de cada capa de hormigón viene limitado por la profundidad a la cual el rodillo vibrante es efectivo, sin producir segregaciones en la mezcla. La separación entre estas capas es lo que constituye la junta horizontal de construcción.

La superficie de cada nueva altura debe permanecer limpia y húmeda durante su exposición a la intemperie. La superficie endurecida debe sufrir algún tratamiento antes de ser cubierta con la siguiente capa. Este trabajo se ve simplificado por el bajo contenido de cemento en la mezcla. Es fundamental proporcionar una estrecha ligazón entre alturas consecutivas en toda la junta horizontal de manera que el conjunto de la presa trabaje como una estructura monolítica. Ya que el contenido de cemento es bajo en el hormigón empleado como para dar la trabazón necesaria, resulta muy útil extender sobre la superficie una fina capa de mortero o un hormigón rico en pasta cementicia, tal como se emplea en el método RCD.

En el caso del RCC, los peligros de posibles filtraciones por no dar un tratamiento especial en juntas, se controlan en el paramento aguas arriba de la presa. En otros casos se emplean excesos de pasta que proporcionen esa trabazón entre capas, siempre que no se sobrepase el tiempo de madurez.

Los resultados de los ensayos realizados en la presa de Upper Stillwater (Utah), revelaron una serie de factores que condicionan la unión en juntas:

- Limpieza de la junta.
- El contenido de mortero en la mezcla debe ser suficiente para llenar los huecos que deja el árido grueso y poder llegar además hasta la parte más baja de la capa, es decir, a la junta de construcción.
- El menor tiempo transcurrido entre puestas sucesivas produce la mejor unión.
- El trabajo debe suspenderse en caso de que llueva pues la superficie quedaría muy pastosa si así no se hace.

- El espesor de la capa no debe superar las 12 in. (30 cm.).
- El grado de compactación por el rodillo deberá, en función de la trabajabilidad de la mezcla, garantizar una completa consolidación.

Juntas Verticales de Construcción

Las juntas verticales, si se realizan, es normalmente con el fin de proteger al cuerpo de presa de la aparición de fisuras debidas a tensiones de origen térmico. En dosificaciones con bajo contenido de cemento, no resultan necesarias al ser bajo el calor de hidratación, y por tanto la temperatura alcanzada (RCC).

No obstante, la separación entre juntas verticales permite ser mayor que en el caso de presas con hormigón convencional (RCD). Estas juntas se ejecutan con una cortadura vibratoria después de realizado el extendido, en la técnica japonesa.

En la técnica americana, por ejemplo en las presas de Willow Creek y Upper Stillwater, no se pusieron juntas verticales, y la disminución del calor se consiguió, a base de mantener un bajo contenido de cemento.

2.3. Protección contra los efectos de las heladas

Los resultados de numerosos ensayos, muestran la baja capacidad del HCR, para resistir los ciclos de hielo-deshielo, como ya apuntábamos anteriormente. No existe un criterio unificado que de validez al empleo de aireantes con el fin de paliar este efecto. Se debe tratar de no exponer las superficies a climas severos o bien, disponer de determinados elementos que protejan al resto de la estructura.

En presas se han utilizado elementos prefabricados, colocados en el paramento, e incluso, sustitución de todo él por hormigón convencional, rico en cemento y aireantes, lo cual le da al conjunto unas características resistentes generales mucho mayores.

La resistencia al hielo-deshielo depende de la cantidad de aire ocluido en el hormigón. Valores del aire ocluido superiores al 5-6 por 100 ga-

rantizan una resistencia al hielo-deshielo suficiente. Los hormigones elaborados con cenizas volantes, a igualdad de aire ocluido en el hormigón, tienen una resistencia al hielo-deshielo equivalente a los hormigones de cemento Portland (13).

2.4. Impermeabilidad

Aunque ya se ha dicho algo sobre este tema, conviene destacar el hecho de que cualquier método de diseño de presas con HCR, exige una impermeabilidad, tanto en el material como en las juntas de construcción que se lleven a cabo. La trabazón de dichas juntas, que ya se ha analizado, juega un papel fundamental en la consecución de este objetivo.

En algunos casos se ha confiado la impermeabilización de la presa a la colocación zonas de hormigón convencional o incluso de membranas impermeables (Presa de Winchester) en el paramento aguas arriba, que deberán ser acompañadas de un adecuado sistema de drenaje interno, como en cualquier otro tipo de presa.

La compactación con rodillos vibratorios de una alta densidad, soluciona el problema de la permeabilidad en el seno del propio hormigón, aunque como hemos dicho esto no supone que no podamos encontrar filtraciones debidas a un mal tratamiento de juntas.

2.5. Aditivos

Son muy escasas las menciones de tipo general que, sobre los efectos que el empleo de los aditivos producen en las propiedades del hormigón compactado, podemos encontrar en la bibliografía existente.

De manera esporádica se encuentran empleos de aireantes que mejoran la resistencia al hielo, la impermeabilidad y la manejabilidad de los hormigones y, por consiguiente la durabilidad. Su efecto coadyuvante a la fluidificación de los hormigones jóvenes, ya se produce por el mero empleo de cenizas volantes, tal como se explicó al hablar de las resistencias a las heladas intermitentes.

El aditivo cuyo empleo ha sido más frecuen-

te en el HCR es el retardador de fraguado, cuyo objetivo es controlar el tiempo de madurez, sobre todo en épocas calurosas. También se han empleado aditivos reductores de agua-retardadores de fraguado. En la construcción de la Presa de ELK CREEK (Oregón-USA) se ha empleado con éxito un aditivo de este tipo (16,3 kg./m³ de hormigón), consiguiéndose, con su incorporación una mejora de la trabajabilidad, habiéndose reducido de 20 segundos a 10 segundos el tiempo de VeBe.

2.6. Galerías

Resulta evidente que la colocación de galerías en una presa de HCR representa una clara interferencia con el método continuo de colocación. Tanto la colocación de encofrados tradicionales como el empleo de paneles prefabricados, suponen un incremento adicional del coste y un aumento del tiempo de ejecución. La sección de la galería, deberá ser lo más pequeña posible con objeto de minimizar las posibles concentraciones de tensiones.

Un posible método que proponen Eric B. Kollgaard y Harry E. Jackson (26), consiste en rellenar paralelamente la galería al resto de la presa, pero con un material sin cemento. Este material se extrae de la presa una vez que la altura ha alcanzado una cota suficientemente elevada por encima de aquella. El inconveniente que presenta es la irregularidad superficial que presenta el interior de la galería, lo cual se ha conseguido eliminar en parte colocando un en tablado adecuado de separación entre ambos materiales.

2.7. Métodos de dosificación

Se han desarrollado una serie de métodos para la dosificación de las mezclas empleadas en los hormigones compactados con rodillo (27). En primer lugar consideraremos aquellos relativos al RCC, los cuales podemos agrupar a su vez en:

- Dosificación del hormigón compactado a través de ensayos de trabajabilidad.
- Método de las mezclas.
- Dosificación empleando métodos de compactación de suelos.

En segundo lugar analizaremos el método japonés de dosificación (RCD).

Dosificación de RCC a través de ensayos de trabajabilidad

Los pasos seguidos en la dosificación, semejantes a los del hormigón en masa y vibrado son:

— Determinación de una composición granulométrica óptima que permita obtener, partiendo de una relación fijada de agua/productos cementicios (W/C + F) los valores especificados de:

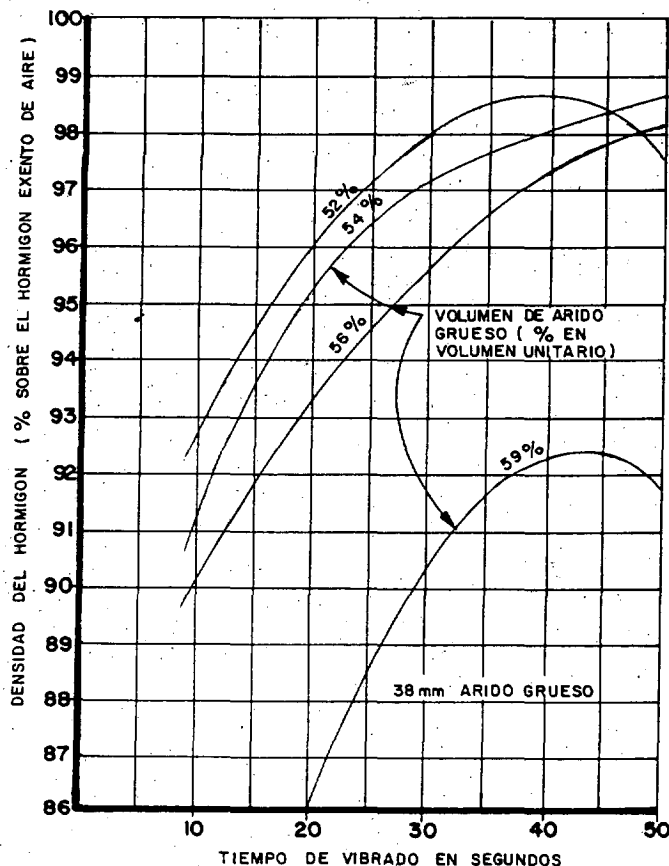
- Resistencias mecánicas.
- Cambios térmicos.
- Unión entre tongadas.
- Impermeabilidad.

Para la medida de la trabajabilidad se emplea un consistómetro VeBe modificado, ya descrito en el análisis de las propiedades. El tiempo óptimo VeBe está influido por la dosificación del hormigón, y en particular por el contenido de agua, granulometría del árido grueso y contenido de finos inferiores a las 75 micras.

La granulometría del árido grueso debe ser aquella que proporcione, el mínimo contenido de huecos, de tal manera que se precise la mínima dosificación de mortero. Esta depende fundamentalmente de los efectos combinados del ya nombrado volumen de huecos y además del área superficial y coeficiente de forma del mismo. La figura de la página siguiente analiza la influencia que tiene el volumen total de árido grueso en la compactación. En ella podemos observar como, al disminuir el contenido de gruesos se alcanzan densidades óptimas mayores para el mismo tiempo de vibrado.

— El siguiente paso es determinar la dosificación de árido fino para una demanda mínima de pasta. El mínimo contenido de pasta, puede determinarse por las curvas de densidad máxima. A partir de la relación agua/conglomerante, se añaden finos, de tal forma que obtenemos una curva densidad-volumen de pasta, en la cual podremos determinar el que proporcione la densidad máxima. Este contenido de pasta deberá incrementarse entre un 5-10 por 100 para obtener la trabajabilidad adecuada. En

HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO



MORTERO EXENTO DE AIRE
 ARENA = 62,8 % de VOLUMEN
 AGUA = 16,5 % de VOLUMEN
 CENIZAS VOLANTES = 20,7 % de VOLUMEN
 CEMENTO = 0

EFFECTO DEL VOLUMEN DE ARIDO GRUESO EN LA COMPACTACION

los hormigones empleados en las juntas de construcción o juntas frías este mínimo contenido de pasta se debe incrementar hasta un 20-25 por 100.

Corresponde, en líneas generales al método descrito en las Normas ACI 211.3-75, y ha sido empleado en las presas de Upper Stillwater, Milton Brooke y Pamo, así como en las de Morales y Castilblanco, estas dos últimas en España.

Método de las mezclas

Estos métodos emplean, para obtener la composición óptima del árido, husos granulométricos establecidos previamente. Estos husos incluyen desde un tamaño máximo de 80 a 50 mm. hasta finos menores de 80 micras, y a par-

tir de ellos va variando el contenido de productos cementicios de la mezcla. El mínimo contenido de cemento que proporcione la resistencia requerida por el proyecto, con la trabajabilidad adecuada para su puesta en obra será el adoptado. En la página siguiente hemos englobado en una gráfica distintos husos empleados a tal efecto. En ella observamos una estrecha similitud entre los distintos casos considerados.

El contenido de pasta obtenido con este método de dosificación resulta ser inferior al necesario para rellenar los huecos de los áridos. Este procedimiento se ha usado fundamentalmente con contenidos de cemento que varían entre 30 y 300 kg. por metro cúbico con resistencias al año desde 4 a 40 MPa.

El contenido de agua se controla de manera que se obtenga la máxima densidad durante la compactación. Una vez obtenida la densidad óptima mediante ensayos, este contenido permanece invariable ante pequeñas variaciones de productos cementicios. Los ensayos generalmente se hacen empleando únicamente cemento, o con una mezcla de cemento-cenizas volantes cuyo contenido varía entre el 20 y el 50 por 100.

En este tipo de hormigones los áridos empleados generalmente proceden de yacimientos próximos o incluso de productos procedentes de la excavación más o menos procesados, siempre y cuando el árido total se adapte al huso preestablecido.

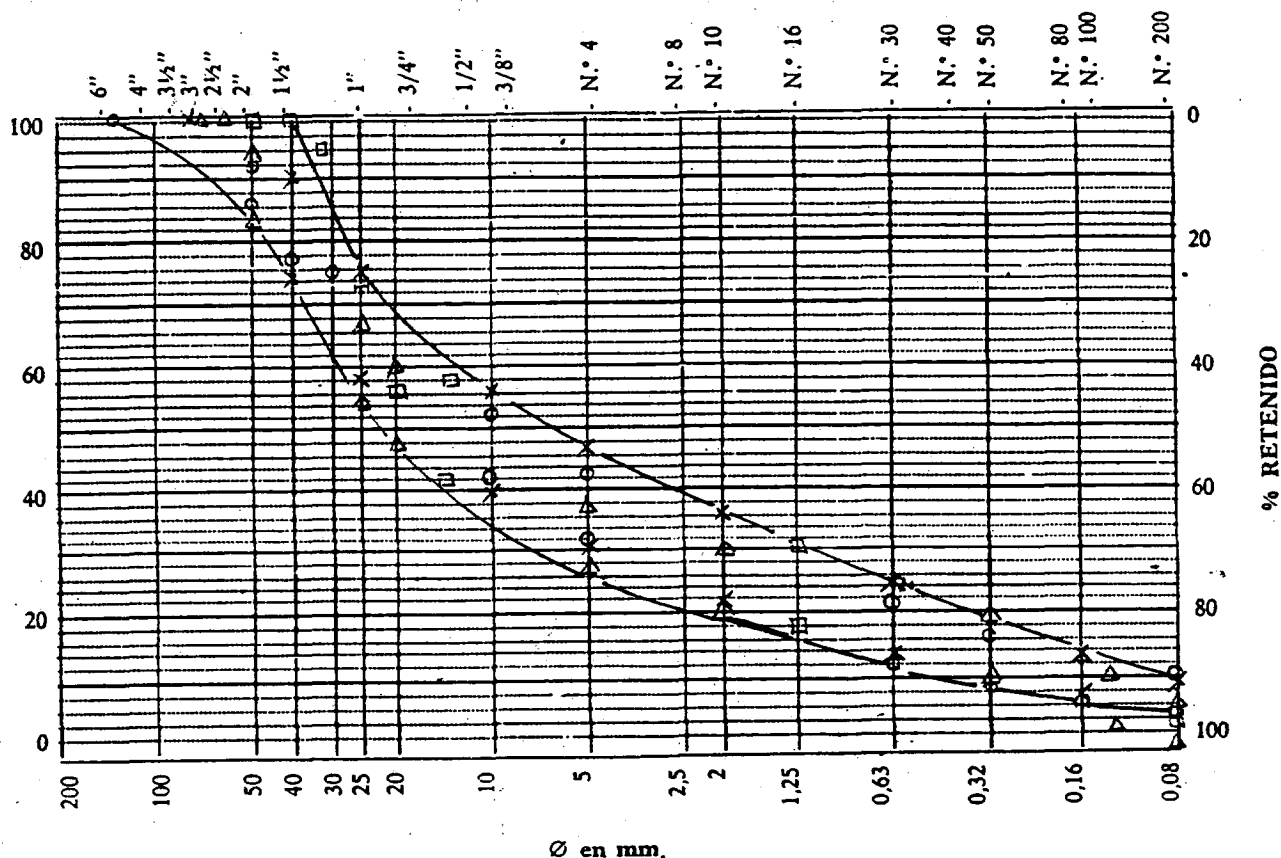
En algunos proyectos en los que este método ha sido empleado se ha admitido un contenido de finos de hasta un 10 por 100 sobre el árido total dependiendo de su plasticidad. El contenido de agua resulta ser generalmente superior en este tipo de hormigones que el del hormigón en masa vibrado.

Ejemplos de esta segunda técnica pueden ser presas como las de Willow Creek (EE.UU.) y la de Saco en Brasil.

Dosificación empleando métodos de compactación de suelos

Este método conlleva la determinación de la máxima densidad seca empleando procedi-

Tamices Serie A.S.T.M.



GRANULOMETRIAS CONSIDERADAS

- x , PRESA DE SACO (BRASIL). (29)
- o , PRESA DE MONKVILLE (EEUU). (28)
- Δ , PRESA DE WILLOW CREEK (EEUU). (20)
- □ , PRESA DE CASTILBLANCO (ESPAÑA). (16)

mientos semejantes a los utilizados en la tecnología del suelo-cemento. El equipo generalmente empleado es el del Proctor modificado. Dependiendo del tamaño máximo de árido, se han empleado moldes de distintos tamaños, conservándose la energía de compactación del Proctor modificado.

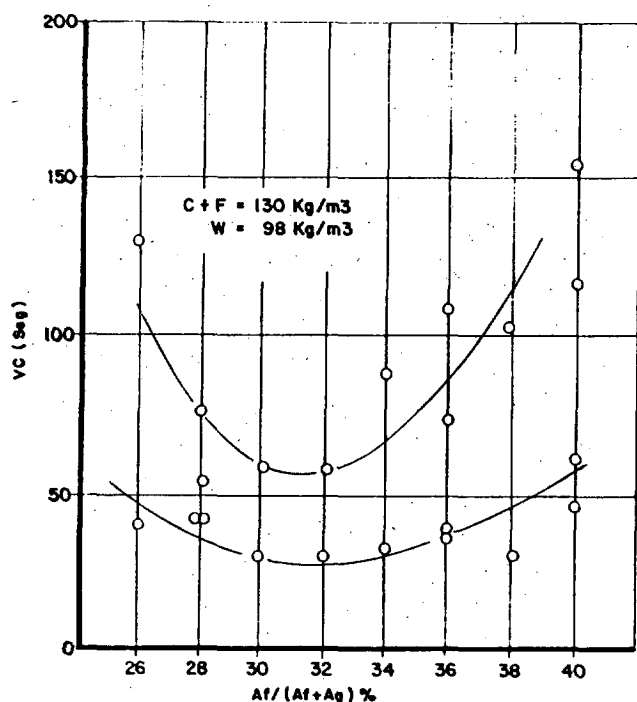
Este método ha sido empleado en la presa de Tarbela (Pakistán).

Dosificación por el método RCD

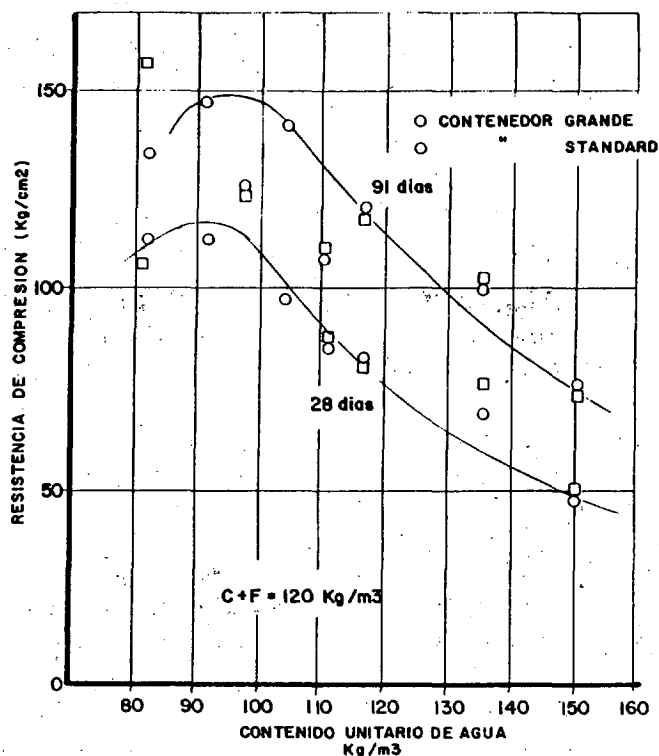
Este método se caracteriza, entre otras particularidades, por el empleo de un tamaño má-

ximo de árido que se encuentra comprendido entre 80 mm. y 150 mm. La dosificación se realiza de manera que se obtenga un árido con el menor contenido de huecos. El método de dosificación incluye la determinación de la relación árido fino/árido total óptima para una determinada dosificación de agua y productos cementicios. Esta determinación se realiza con un consistómetro análogo al VeBé modificado. La relación óptima árido fino/árido total determinada por este método es aquella con la que se alcanza un tiempo de vibración mínimo (ver figura) y se denomina VC (Vibrating Compacting Time).

DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO EN LAS PRESAS DE JAPON



RELACIONES ENTRE EL VALOR 'VC' Y EL PORCENTAJE DE ARENA



RELACIONES ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESION Y EL CONTENIDO UNITARIO DE AGUA

Existe una correlación entre el valor VC y el contenido de agua. El valor de VC adoptado debe ser aquel que proporcione un hormigón con la trabajabilidad adecuada para su correcta puesta en obra.

Igualmente se puede establecer una relación entre resistencia a compresión y contenido de agua, del estilo de la que aparece en la figura de la siguiente página. En ella se aprecia como para una cantidad de productos cementicios fijada, los máximos de resistencia, tanto a 28 como a 90 días, aparecen alrededor, para este caso concreto, de los 90 kg. de agua por metro cúbico. Para contenidos superiores al óptimo, las resistencias mecánicas disminuyen por aumentar la relación agua/productos cementicios. Para contenidos inferiores, si bien disminuye esta relación, el aumento de contenido de huecos tiene mayor importancia y la resistencia es baja.

2.8. Ventajas económicas de la construcción de presas con HCR

Las ventajas económicas que se observan son principalmente:

- Reducción en los períodos de construcción.
- Racionalización del proceso constructivo.
- Ahorro en materiales cementicios.
- Empleo de maquinaria de uso común.
- Otras ventajas: facilidad de movimientos de trabajadores, maquinaria y materiales.

3. HORMIGONES COMPACTADOS EN CARRETERAS

3.1. Definición general

El hormigón compactado con rodillo es uno de los materiales cuyo empleo para carreteras

ha despertado mayor interés en los últimos años. La Instrucción española de Secciones de Firme de Autovías (1) lo define como una mezcla homogénea de áridos, agua y conglomerante, que se pone en obra de forma análoga a una grava-cemento, aunque su contenido en cemento se similar al de un pavimento de hormigón vibrado.

3.2. Breve desarrollo histórico

Su origen se remonta a los primeros firmes rígidos contruidos con hormigón hace más de un siglo, aunque bien es cierto que la vibración como método para compactar es más reciente (Francia, 1925). La mejora introducida en los sistemas de vibración de hormigones hicieron que su uso en pavimentos se viera abandonado a pesar de seguir utilizándose las mismas técnicas en las gravas-cemento de las capas de base. Fueron precisamente los avances obtenidos en el empleo de estos materiales los que han dado la base a las actuales prescripciones técnicas para hormigones compactados.

En España, las primeras aplicaciones de las que se tienen datos se realizaron alrededor de 1970 en la provincia de Barcelona para pavimentos sometidos a tráficos ligeros, en zonas rurales y calles urbanas. El desarrollo moderno de la técnica del hormigón compactado ha permitido su utilización para carreteras con tráficos importantes y ha hecho posible la elaboración de Normas en algunos países.

3.3. Características y propiedades generales

Las características principales de este material podemos resumirlas en los siguientes puntos:

- Bajo contenido de agua (entre el 4,5 por 100 y el 6 por 100) que se aproxima mucho al del óptimo del ensayo Proctor modificado.
- Índice de capacidad soporte inmediata alto, lo que permite que sea puesto bajo circulación nada más finalizar su compactación en obra.
- Contenido en cemento similar al de un hormigón clásico; el cemento puede ser

con alto contenido en cenizas volantes o escorias.

- 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.

Su definición como técnica híbrida entre las bases tratadas y los pavimentos de hormigón (1), permite vencer una serie de limitaciones que se presentaban en aquellos casos:

- En lo relativo a gravas-cemento, al disminuir la relación agua/cemento la retracción hidráulica es más baja, con lo que la separación entre fisuras es bastante menor de la habitual.
- El aumento en el contenido de conglomerante, y las variaciones del mismo originadas por el sistema de dosificación, tienen una menor influencia en las resistencias alcanzadas por el material.
- El menor coste de ejecución que supone el no tener que utilizar una maquinaria especial.

Las técnicas de construcción del HCR tienen la ventaja de poder llevarse a cabo con determinados materiales con granulometrías, plasticidad y otras características que normalmente no serían permitidas en el hormigón convencional. La colocación con elevadas consistencias minimiza las pérdidas de resistencia que tienen lugar como consecuencia de la adición de agua en hormigón convencional debido a las exigencias de una mínima docilidad. A pesar de estas ventajas el módulo de elasticidad suele ser inferior, presentándose además otro tipo de limitaciones:

- Estructura interna vulnerable ante la acción de los ciclos de hielo-deshielo en el caso de hormigón saturado.
- Sensibilidad a las variaciones de humedad en el mezclado y extendido del material así como a los defectos de compactación que se traducen en una considerable disminución de las resistencias.
- Dificultad de conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con moto-

niveladora. Se recomienda un reperfilado.

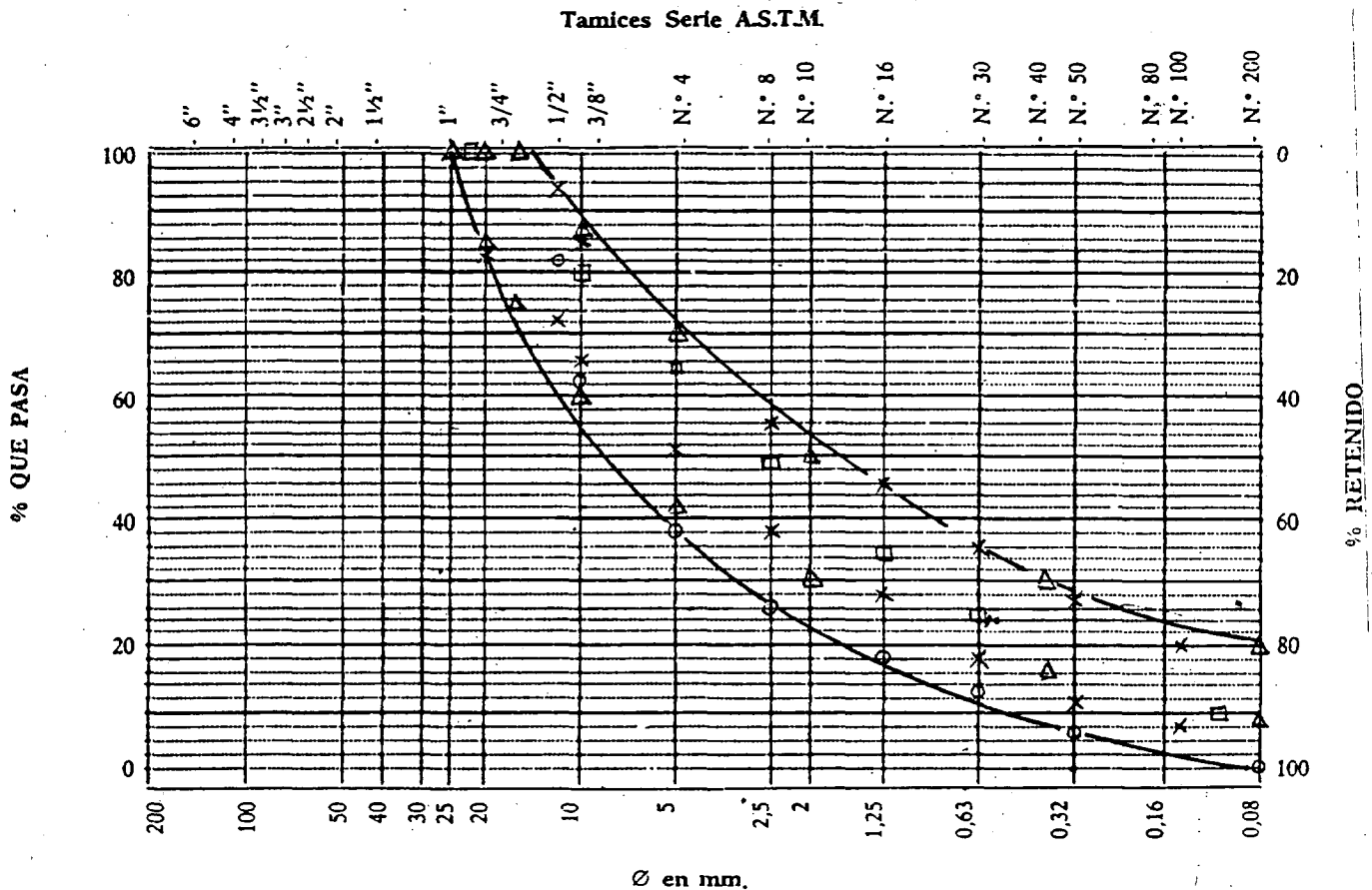
- Necesidad de colocación de una capa de rodadura asfáltica para tráficos importantes.

3.4. Materiales

3.4.1. Aridos

Para evitar riesgos de segregación y obtener una mayor calidad superficial, la mayoría de las

normas recomiendan que el tamaño máximo sea de 20 mm., e incluso de 16 mm. Esto facilita a su vez el mezclado del material. La granulometría de los áridos, tal como muestra la figura adjunta, ha de ser continua. El contenido total de finos, suele provocar un «colchoneo del material en su compactación. En general, cuando se trate de refuerzos bajo circulación, debe tenderse a usar curvas con bajo contenido de finos.



GRANULOMETRIAS CONSIDERADAS

- Δ , INSTRUCCION ESPAÑOLA SOBRE SECCIONES DE FIRME EN AUTOVIAS (1).
- \circ , CUERPO DE INGENIEROS MILITARES DE EEUU (33).
- \times , CUERPO DE INGENIEROS DE EEUU (30).
- \square , TASMANIA (AUSTRALIA) (31).

Debido a la ventaja antes mencionada de su posibilidad de inmediata apertura al tráfico, es necesario que el esqueleto mineral formado por los áridos compactados tenga una estabilidad o capacidad de soporte inmediato, suficientemente alta. Por ello se hace necesario que al menos los 2/3 de los áridos procedan del machaqueo.

3.4.2. Conglomerantes

Los cementos más apropiados para su uso en capas de firmes de carreteras son aquellos con un bajo calor de hidratación, poca retracción y elevadas resistencias a largo plazo, que contrarresten los fenómenos de fatiga. Por ello los más usualmente empleados por orden de prelación, según nos describe la Norma UNE 80-301 (21), son:

- Cementos mixtos tipo V, obtenidos mediante molturación conjunta de clinker Portland y adiciones activas. A las ventajas derivadas de su homogeneidad se 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.
- Cemento Portland con adiciones tipo II.
- Mezclas en planta de cementos tipo I o como máximo tipo II, y cenizas volantes.

En el caso de utilizar cenizas volantes, éstas deberán ser preferentemente de tipo silicoaluminoso pues la cal libre puede originar problemas de expansiones (túnel del Cadí).

El contenido de conglomerantes oscila entre el 10 por 100 y el 14 por 100.

Como tendencias generales de los hormigones compactados fabricados con cementos tipo V, se pueden destacar:

- Elevados crecimientos de las resistencias de 28 a 90 días (del orden de un 30 por 100).
- Ganancia de resistencia al aumentar el

contenido de conglomerante (del orden de un 100 por 100 al pasar de un 10 por 100 a un 13 por 100 de conglomerante).

3.4.3. Aditivos

Pueden utilizarse aditivos que mejoren ciertas características de la mezcla.

El empleo de reductores de agua (fluidificantes) hace 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 se hace imprescindible en estos casos, salvo si la temperatura de puesta en obra es baja, son los retardadores de fraguado que aumentan el plazo de trabajabilidad del material que mencionábamos en las características generales del HCR.

3.5. Humedad y energía de compactación

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 por 100 a un 4 por 100, mientras que dicha humedad óptima suele estar comprendida, al igual que en una gravacemiento, entre un 4 por 100 y un 7 por 100.

Uno de los inconvenientes de los hormigones compactados es, como ya se ha mencionado, su sensibilidad a las variaciones de humedad frente a la compactación obtenida. Un exceso o defecto de agua, así como una densidad insuficiente, lleva a disminuir notablemente las resistencias mecánicas, así como a una regularidad superficial defectuosa. Por otra parte, una falta de humedad lleva consigo los riesgos de segregación en la superficie del firme.

Estos defectos pueden manifestarse incluso con variaciones de $\pm 0,5$ por 100 de la humedad con respecto a la óptima definida en ensayos previos (Proctor modificado, ensayo VeBe, etc.).

3.6. Criterios de proyecto y construcción

3.6.1. Espesores. Resistencias. Capas

Los espesores definidos en la Instrucción de Autovías oscilan entre 20 cm. para tráficos en-

tre 750 y 2.000 vehículos pesados/día, y 25 cm. para tráficos mayores de 2.000 vehículos pesados/día. En ambos casos se requieren 8 cm. de mezcla bituminosa, en superficie, y 20 cm. de suelocemento en subbase. Asimismo se especifica un espesor mínimo de 15 cm. por razones de tipo constructivo, pudiéndose reducir el contenido de cemento para disminuir la resistencia, si por cálculo hubiese resultado un espesor inferior.

Los ensayos realizados para la medida de la resistencia, son distintos según los países: en Francia, por ejemplo, se viene utilizando el ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño); mientras que en el caso de España la Instrucción de Autovías prescribe el ensayo a flexotracción. La edad del ensayo depende del tipo de conglomerante utilizado, ya sean de fraguado normal (28 días), o más adecuadamente con elevado contenido de adiciones activas y endurecimiento lento (56-90 días). Las resistencias exigidas para tráficos intensos son del orden de 3.3 MPa en tracción indirecta, y 4,5 MPa a flexotracción.

Las bases utilizadas bajo los pavimentos de hormigón compactado dependen del tipo de terreno y pueden variar desde gravascemento o bases granulares en el caso de tráficos bajos, hasta la misma explanada, como se viene haciendo en España para tráficos ligeros.

3.6.2. *Textura superficial*

Si la regularidad obtenida es buena, es suficiente un tratamiento superficial con ligantes fluidificados. La terminación que produce el paso de los rodillos vibrantes deja por lo general, bastante que desear, por lo que es preciso el empleo de capas de mezclas bituminosas como antes apuntábamos. Otras técnicas empleadas consisten en un extendido superficial de lechada de cemento, seguido de un fratasado mecánico.

3.6.3. *Tratamiento de fisuras. Juntas*

Las juntas longitudinales se producen en situaciones excepcionales, tratándose de evitar tal como indica el Art. 7.5.2 de la Instrucción de Autovías.

En el caso de juntas transversales, debemos distinguir entre las de retracción y las de trabajo. El no serrar las juntas ha sido práctica habitual hasta fechas recientes. Las fisuras aparecidas presentan espaciamientos que varían entre 7 y 50 metros. Las causas de estas diferencias parecen estar en las condiciones de rozamiento, la naturaleza de la capa subyacente y las condiciones meteorológicas durante la puesta en obra, más que en las propiedades del material.

Las juntas de trabajo transversales deben disponerse al final de cada jornada, o siempre que el proceso constructivo se interrumpa durante un tiempo superior al plazo de trabajabilidad de la mezcla. Este tiempo se fija alrededor de las dos horas, en el caso de no utilizar retardadores de fraguado o cementos de fraguado lento con elevado contenido de adiciones.

En esta práctica es fundamental conseguir que los bordes de las juntas queden perfectamente verticales, para evitar riesgos de pandeo así como de cabalgadura de unas losas sobre otras. Para ello se han empleado varios sistemas: colocación de encofrado de madera, disposición de una banda de material granular después de recortar el hormigón compactado con niveladora, etc.

3.7. **Fabricación, puesta en obra y control**

Para la fabricación pueden utilizarse tanto las centrales continuas empleadas en la fabricación de las gravascemento como las centrales clásicas discontinuas para hormigón; el mejor rendimiento de las primeras las hace más usuales.

En los acopios y manipulación de áridos deberán tomarse las precauciones necesarias para impedir segregaciones, degradaciones, contaminaciones o mezclas de materiales de distintos tamaños. Es recomendable proteger los acopios de áridos con toldos, y ensilar las cenizas volantes.

El transporte se realiza en camiones volquete, disponiendo tolvas intermedias de carga para evitar la segregación, y protección con lonas en el caso de condiciones climáticas adversas.

El extendido del material puede realizarse me-

diante motoniveladora, o bien con extendedora de las usadas para gravacemento o para aglomerado asfáltico. Si se utiliza motoniveladora el refinado posterior es imprescindible para conseguir un buen acabado.

El orden de intervención de los equipos de compactación debe ser:

- En primer lugar, rodillo vibrante sin vibración para no estropear la calidad de la regularidad superficial.
- A continuación el rodillo con vibración del orden de 8 pasadas).
- Por último, el compactador de neumáticos (unas 15 pasadas).

En la ejecución de juntas se tendrán en cuenta los comentarios hechos anteriormente. Se serrarán a distancias entre 10 y 15 metros.

El curado se hará mediante pulverización fina de agua, que no produzca ningún encharcamiento. Si el tráfico va a darse inmediatamente se debe dar un tratamiento que consista en riego con emulsión no ácida. Si el pavimento de hormigón compactado está destinado a ser la capa de rodadura, es imprescindible el empleo de líquidos de curado específicos, tal como se definen en la Norma UNE 83.200.

Por las consideraciones antes hechas no debe ejecutarse la puesta en obra durante lluvias. Igualmente el efecto de las heladas puede resultar perjudicial durante el período de endurecimiento.

4. OTROS USOS DEL HCR

Entre la bibliografía que hemos manejado para la realización de este trabajo, hemos encontrado algunas referencias (34) a empleos con éxito del HCR en situaciones distintas a las descritas anteriormente, y que trataremos de resumir brevemente.

- En sustitución al riprap, como protección a la erosión en los márgenes de ríos.
- Como protección sobre cimentación en roca frágil.
- Como solera al pie de azudes en ríos. El espesor colocado era de 1,5 m. y se echó en tongadas de 30 cm.
- De una manera particular se ha emplea-

do también como solera rígida en grandes áreas de almacenamiento de vehículos militares pesados, etc.

- Por último podemos mencionar también aquí, el empleo de HCR en los cajeros del cuenco amortiguador del aliviadero auxiliar en la presa de Tarbela (Pakistán), con finalidades análogas a las ya mencionadas con anterioridad.

5. CONCLUSIONES

Con el HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO se nos abre un nuevo campo de actuación en la búsqueda de sistemas y materiales que economicen los procesos de construcción.

Sus cualidades específicas como material, la economía que supone y su simplicidad en el momento de puesta en obra son algunos motivos que hacen pensar en un amplio futuro para el mismo.

Por el momento, podemos decir que se encuentra en una fase de iniciación. Son los resultados de ensayos y pruebas de laboratorio, así como la extrapolación de las experiencias realizadas en otros países, en los cuales la investigación y colocación de este material está más avanzada, los que rigen su empleo en el campo de la construcción civil.

Como ya apuntábamos anteriormente, los países en los cuales esta técnica está más desarrollada, disponiendo incluso ya de normas propias del HCR, son Estados Unidos y Japón.

Por otra parte, el carácter independiente que hemos querido dar a la utilización del HCR en sus dos grandes campos de aplicación, presas y firmes, no es sino reflejo del tratamiento actual que está sufriendo de una manera generalizada el hormigón compactado como material. Esto no quiere decir, que en un futuro que imaginamos no muy lejano y a la vista de la evidente analogía que existe en la problemática a nivel técnico y económico en ambos campos, podamos contar, cada vez en más países y con una uniformidad más acusada, de Normas que regulen su empleo.

BIBLIOGRAFIA

1. MOPU.: *Instrucción sobre secciones de firmes en autovía*. 1986.
2. E.K. SCHRADER.: *Behavior of Completed RCC Dams. Rolled Compacted Concrete II*. San Diego, 1988.
3. COMISION INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS.: *General Report*. Lausana, 1985.
4. DUNSTAN, M.R.H.: *Rolled Concrete for Dams*. CIRIA Technical Notes 105-106, London, May 1981.
5. ACI Committee 207.: *Rolled Compacted Concrete*. American Concrete Institute, 1983.
6. CARLOS JOFRE, RAFAEL FERNANDEZ y ALEJANDRO JOSA.: *Utilización de los hormigones compactados en carreteras*. Rutas Técnica.
7. U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Bureau of Reclamation.: *Mix Design Investigation-Roller Compacted Concrete Construction, Upper Stillwater Dam, UTAH*. June, 1984.
8. CARLOS JOFRE, RAFAEL FERNANDEZ y CARLOS KRAEMER.: *Concrete pavement construction in Spain*. Transportation Research Board. January 1988.
9. GALARON CASTILLO, Antonio.: «Materiales. Aridos y adiciones». IECA.: *Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas*. Octubre 1987.
10. EJJAOUANI, *Utilisation du beton compacte au rouleau dans des barrages de faible importance cas du barrage Rwedar*. Seizieme Congres des Grands Barrages. San Francisco 1988.
11. FRANCISCO GLADSTON HOLANDA.: *Primera obra brasileña ejecutada completamente en hormigón compactado con rodillo (HCR)*. Conferencia en el hotel Wellington, 15 de Junio de 1987.
12. CEMENT ASSOCIATION OF JAPAN.: *Development in Japan of Concrete Dam Construction by the RCD Method*. 1986.
13. DIRECCION GENERAL DE OBRAS HIDRAULICAS. VIGILANCIA DE PRESAS.: *Diseño, características y comportamiento del hormigón compactado en presas*. Enero, 1988.
14. THE JAPANESE NATIONAL COMMITTEE.: *Question C. New Construction, October 10, 1987*.
15. OCISA.: *Propuesta alternativa de puesta en obra del hormigón de la presa de los Morales*. Mayo, 1986.
16. OCISA.: *Informe sobre la ejecución y control de la presa de Castilblanco de los Arroyos*. Sevilla, Octubre de 1985.
17. UNIVERSIDAD DE SANTANDER.: *Estudio e Investigación de hormigones en masa, con mínima retracción, para construcción continua de Presas de Fábrica I y II*. Santander, Julio de 1983.
18. REVISTA DE OBRAS PUBLICAS.: *Congreso Mundial de Grandes Presas*. Madrid, Junio de 1973.
19. REVISTA DE OBRAS PUBLICAS.: *Congreso Internacional de Grandes Presas*. México, D.F., Marzo de 1976.
20. E.K. SCHRADER.: *Proyecto de Ejecución de la presa de Willow Creek (EE.UU)*. 1982.
21. NORMA UNE 80-301, *Cementos: definiciones, especificación y clasificaciones*.
22. R. SPRINGENSCHMID, P. SONNEWALD.: *Permeability, Frost Resistance and Crack Prevention of RCC*. ICOLD. Lausana, 1985.
23. F. HOLLINGWORTH, F.H.W.M. DRUYTS.: *Experimental use of Rollcrete on Sections of a Concrete Gravity Dam*. ICOLD. Lausana, 1985.
24. TAKESHI YAMAUCHI, JOJI HARADA, TERVO OKADA y SHOICHI SHIMADA.: *Construction of Tamagawa Dam by the RCD Method*. ICOLD. Lausana, 1985.
25. ALAN T. RICHARDSON PE.: *Upper Stillwater Dam. Roller Compacted Concrete Design and Construction Concepts*. ICOLD. Lausana, 1985.
26. B. KOLLGAARD y HARRY E. JACKSON.: *Design Innovations for Rolled Compacted Concrete Dams*. ICOLD. Lausana, 1985.
27. REPORT TO ICOLD COMMITTEE ON MATERIALS FOR CONCRETE DAMS.: *Roller Compacted Concrete for Gravity Dams*. Noviembre, 1987.
28. STEVEN H. SNEIDER and ERNEST K. SCHRAIDER.: *Monksville Dam: Design Evolution and Construction*. Roller Compacted Concrete II. ASCE. San Diego, 1988.
29. JIN T. QUIN, SEVERINO REZENDE and ERNEST K. SCHRADER.: *Saco Dam-South America's First RCC Dam*. Roller Compacted Concrete II. ASCE. San Diego, 1988.
30. OSWIN KEIFER, JR.: *Corps of Engineers Experience with RCC Pavements*. Roller Compacted Concrete II. ASCE. San Diego, 1988.
31. DAVID M. BRETT.: *RCC Pavements in Tasmania, Australia*. Roller Compacted Concrete II. ASCE. San Diego, 1988.
32. CARLOS JOFRE, RAFAEL FERNANDEZ, ALEJANDRO JOSA and FERMIN MOLINA.: *Spanish Experience with RCC Pavements*. Roller Compacted II. ASCE. San Diego, 1988.
33. STEVEN A. RAGAN.: *Proportioning RCC Pavement Mixtures*. Roller Compacted Concrete II. ASCE. San Diego, 1988.
34. FRED A. ANDERSON.: *RCC Does More*. Concrete International. May, 1984.
35. G. GOMEZ LAA.: *Rollcrete in the Erizana Dam*. ICOLD. Lausana, 1985.