

Adecuación de los hormigones a las necesidades de los distintos tipos de obras (dosificaciones, tipos de cemento, reología, etc.)^(*)

Por FRANCISCO JAVIER SORIA GARCIA-RAMOS

Después de pasar revista a cada uno de los materiales componentes del hormigón, en especial los cementos, se describen los diversos tipos de hormigón en relación con los distintos tipos de obras: hormigones especiales, influencia de las condiciones climáticas en la adecuación de los hormigones en obra y la importancia de la reología del hormigón para facilitar el transporte y la colocación en obra. El presente trabajo fue galardonado con el Premio HALESA 1984.

GENERALIDADES

El hormigón, material complejo por naturaleza es, en principio, el resultado de una mezcla de materiales que, con el tiempo, conduce a un conglomerado dotado de unas propiedades idóneas para su aplicación en múltiples usos, singularmente en la construcción, en general, y en la edificación y obras públicas, en particular.

Como material de construcción con personalidad propia, el hormigón consta de tres componentes principales: *cemento, áridos, y agua*, acompañados con frecuencia de un cuarto, los *aditivos*, los cuales, aunque su empleo es siempre en proporciones muy reducidas, pueden producir notables cambios en las propiedades del hormigón, unas veces en pro y otras en contra, según los casos; sus efectos son enérgicos casi siempre y, por tanto, su manejo delicado.

Tradicionalmente se ha valorado mucho la calidad de un hormigón en obra por la experiencia y profesionalidad de las gentes, considerando su preparación como un arte o un oficio. Hoy día más que de «reglas del arte» se debe hablar de «técnicas de construir» (1).

Cada día se pide más disponer de hormigones que satisfagan características muy estrictas en todos los aspectos, desde su *reología* hasta su *durabilidad*, pasando por las *resistencias*, y esto para cada tipo de obra.

Estas exigencias obligarán a definiciones más

precisas de la calidad de los cementos y de los áridos (eventualmente de las adiciones), un desarrollo importante de los controles y autocontroles y, por tanto, a la aplicación de los métodos estadísticos en los trabajos de construcción. En la práctica, estas exigencias se traducirán en el desarrollo del hormigón preparado y de la prefabricación, lo que permitirá superar los condicionamientos climáticos y buena parte de los aleatorios de la obra.

El hormigón no es un material prefabricado, como pueden ser el acero y los productos cerámicos, con propiedades definidas y perfectamente medibles y ensayadas antes de su uso. El hormigón se produce cada vez que se usa y sus propiedades, particularmente las resistencias mecánicas, cambian con el tiempo y no pueden establecerse hasta que el hormigón se encuentra en la estructura.

El conocimiento o la previsión de la resistencia mecánica es, por otra parte, necesario, tanto para garantizar que el hormigón es adecuado para el fin a que se destina, como que cumple con las especificaciones fijadas por el consumidor con las limitaciones pertinentes.

Y no siempre basta que las mezclas cumplan las exigencias de resistencia. A veces se exige, por ejemplo, un mejor aislamiento térmico (lo que obliga a emplear áridos ligeros), una baja retracción por secado, o una durabilidad (resistencia al hielo y ambientes agresivos), lo que obliga a usar distintos cementos y limitaciones en su contenido o a considerar la relación agua/cemento.

^(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1985.

En los últimos años se han hecho grandes avances en la normalización de mezclas de hormigón y en las recomendaciones de uso, desarrollándose todo un esquema de cumplimiento de normas basado en métodos estadísticos. Las organizaciones internacionales o nacionales de más prestigio en este campo son: El Comité Eurointernacional del hormigón (CEB), la Organización de Normas Internacionales (ISO) y el Instituto Americano del Hormigón (ACI).

1. MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGON

1.1. Los cementos

El *cemento es el componente «activo»* del hormigón (unido circunstancialmente a los aditivos). Su acción va siempre unida a la presencia simultánea de agua, con la que reacciona químicamente para dar lugar a la pasta intersticial de la que derivan una serie de productos sólidos, cristalinos unos y amorfos otros (geles), cuya contextura es responsable de la trabazón del conglomerante y de las demás propiedades que lleva consigo esta trabazón. Esta pasta intersticial «fraguada» y «endurecida» conglomerará a los áridos en dicho proceso de hidratación, para crear ese conglomerado rígido que llamamos hormigón.

El cemento, pues, cumple una misión importante en el hormigón: Conglomerar y dar forma.

Por otra parte, mantiene su vitabilidad a lo largo del tiempo y arrastra sus cualidades personales al propio hormigón en mayor o menor cuantía, según su proporción en la mezcla; porcentaje de agua de amasado; naturaleza, granulometría y coeficiente de forma de los áridos; presencia de aditivos, etc.

El cemento queda definido por las *Normas o Pliegos de Condiciones*, donde se fijan unas limitaciones para los distintos tipos, muchas de carácter químico, otras de carácter físico y algunas de carácter mecánico para establecer su tipo resistente.

Estas limitaciones trascienden en unas propiedades que se miden, según las normas, unas veces en el *polvo anhidro* (finura de molido, por ejemplo), otras en *pasta* (fraguado y estabilidad

de volumen, entre otras) y, finalmente otras en forma de *mortero* (como las resistencias mecánicas). Fuera de norma se ensayan propiedades como la resistencia a sulfatos, el comportamiento a los ciclos hielo-deshielo, la reacción árido-álcali, la retracción, etc.

De todas estas propiedades, la atención se centra en tres como las más importantes en el comportamiento del hormigón: *Fraguado*, (con el consiguiente efecto térmico), *estabilidad de volumen y resistencias mecánicas*.

1.1.1. *Fraguado*

Puesto que las propiedades que se buscan en el hormigón endurecido, dependen en gran medida de una adecuada colocación y consolidación en estado plástico, las características de fraguado, sobre todo en su principio, son de capital importancia.

Desde el momento que el cemento se pone en contacto con el agua, se ponen en marcha una serie de reacciones químicas que conducen a la formación de los sólidos antes mencionados que, por su contextura llevan al final del fraguado, momento en que surge ese sólido «congelado» que, en el futuro, será el esqueleto o armazón del sólido global que creará el período de endurecimiento o relleno con el correr del tiempo (curado).

1.1.2. *Estabilidad de volumen*

Las reacciones de hidratación de los cementos van acompañadas de cambios de volumen, unas veces en sentido negativo (retracción, en sus distintas formas), otras veces en sentido positivo (expansión: cal o magnesia libres, exceso de yeso, etc.).

Junto a la falta de estabilidad de volumen creada por los productos que intervienen o se forman en las reacciones de hidratación, existe otra debida al efecto térmico de dichas reacciones.

Esta liberación de calor, unida a la falta de elasticidad y conductividad de todos los componentes del hormigón, hacen que, en ocasiones, se creen estados tensionales en detrimento de la estabilidad mecánica del conjunto. Por

eso, se han hecho algunas especificaciones para los cementos destinados a ciertos usos, limitando su calor de hidratación.

1.1.3. Resistencias mecánicas

La resistencia global del hormigón viene condicionada por distintas variables, una de las cuales es la naturaleza y distribución de la pasta de cemento, la cual hace que dicha resistencia evolucione con el tiempo.

Dentro del sólido que constituye la pasta hidratada, la fracción más importante en el desarrollo mecánico es la tobermorita (producto de la hidratación de los silicatos cálcicos), que nace en estado de gel, acompañada de los sulfoaluminatos, eminentemente cristalinos, que tienden a crear el esqueleto fundamental, sobre todo en las primeras edades del conglomerante.

Según parece, los primeros colaboran en los esfuerzos a flexotracción y los segundos a los de compresión.

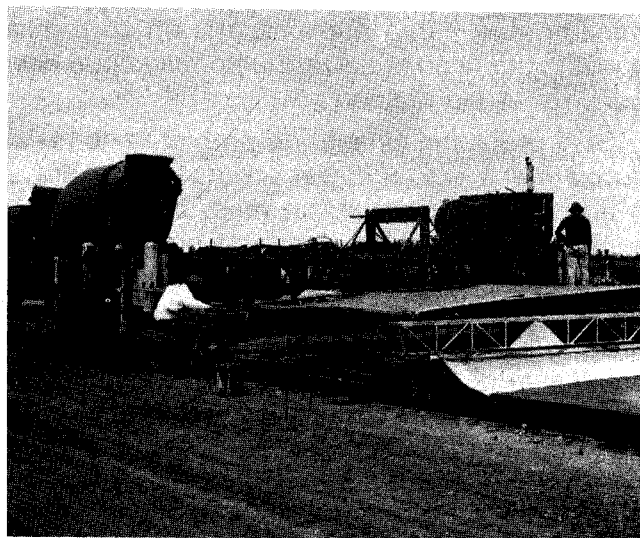
1.1.4. Idoneidad de la aplicación de los diferentes tipos de cementos en obra (2)

El cemento es, como se ha dicho, el ser vivo del hormigón y, por lo tanto, el componente dispuesto a sufrir los efectos de todo lo que le rodea.

Por ello, todos los cementos requieren una serie de precauciones o recomendaciones en su manejo, antes y durante su empleo: Unas de carácter general y otras, más específicas de sus distintos tipos.

Dentro de las *recomendaciones generales* y con respecto a los materiales anhidros, es norma general no emplear ningún cemento recién fabricado, con temperaturas superiores a un cierto límite. También deben tomarse precauciones generales en el almacenamiento, tanto más acusadas cuanto más fino es el cemento o mayor su proporción de portland, caso de tratarse de cementos mixtos.

En la hidratación, todos los cementos tienen tendencia a la *retracción hidráulica*, tanto más acentuada cuanto mayor es su finura. Este fenómeno puede conducir a la fisuración que, en



ciertos casos, puede surgir, incluso en las primeras horas después del amasado. Debe, pues, cuidarse el *curado*, el cual debe ser tanto más prolongado e intenso cuanto más lento sea el endurecimiento del conglomerante (cementos mixtos, tiempo frío y seco, etc.).

Cuando se trata de emplear mezclas de cemento, conviene conocer sus compatibilidades, lo cual es posible en la mayor parte de los casos.

Al tratar de hacer una *recomendación específica* de los cementos, debe de tenerse en cuenta que cada obra se encuentra rodeada de una serie de circunstancias a las que es preciso adaptarse empleando el conglomerante que sea más adecuado a las mismas (carácter del terreno y del ambiente, clases de áridos, condiciones climáticas, tipo de obra, etc.), a la vez que el resto de los componentes del hormigón, sus proporciones y la tecnología empleada sean los más adecuados.

Todos los conglomerantes hidráulicos, salvo los cementos aluminosos, pertenecen a la familia de los silicocalcáreos, por ser sus constituyentes esenciales los silicatos cálcicos.

El primer miembro de esta familia es el cemento portland. Todos los demás (PA, siderúrgicos y puzolánicos) se componen de cemento portland en proporción variable, según los casos, y de otros componentes que de una u otra forma colaboran en el desarrollo hidráulico (escoria granulada de horno alto y puzolana).

La idoneidad de un cemento para una deter-

minada obra habrá que buscarla en su propia constitución y en la del producto resultante después de la hidratación.

Si el problema es sólo un problema de resistencia *mecánica*, a lograr en un tiempo breve o un plazo prudencial (un mes, por ejemplo), se debe pensar en los cementos portland de las categorías superiores (P-550 ARI, por ejemplo). En este sentido, especialmente en plazos muy breves, el cemento aluminoso es superior a cualquiera de los portland. Campos específicos de aplicación son: El hormigón pretensado, los hormigones armados que requieren un desencofrado y puesta en servicio rápidos o soportar esfuerzos importantes, la prefabricación (especialmente pretensada) y, la construcción en tiempo o climas fríos.

Este excepcional comportamiento resistente de los cementos portland de categoría superior se debe a que en su constitución abunda el silicato tricálcico (en proporciones que oscilan de 50 a 70 por 100), ayudado en ocasiones con un porcentaje notorio de aluminato tricálcico (de 10 a 15 por 100). La hidratación de ambos minerales es rápida y la masa adquiere un endurecimiento destacado en un plazo de horas. A este fenómeno colabora un aumento en la finura.

Ahora bien, si tenemos que preparar un *hormigón en grandes masas*, el carácter fuertemente exotérmico de la hidratación de los cementos antes mencionados, unido a la baja conductividad térmica de todo material pétreo (como es el caso del hormigón) crearía grandes diferencias de temperatura en la masa y con ello un grave peligro de contracciones térmicas y fisuras. En este caso, se debe pensar en cementos portland de bajo contenido en silicato tricálcico y, si es posible, reducido o moderado contenido en aluminato tricálcico; así se aumenta el contenido en silicato bicálcico y, con ello, se atenúa el efecto térmico y la velocidad en su desarrollo. Nos encontramos ante un cemento «frío» (Figura 1). Simultáneamente, se limita el desarrollo resistente en las primeras edades, perdiéndose las ventajas de los cementos ARI antes mencionados. Un ejemplo sería el P-350 del RC-75.

Exagerando esa «frialidad» pueden prepararse cementos «extrasilíceos» (ricos en sílice y abundante silicato bicálcico) que, simultánea-

mente a su bajo calor de hidratación, tendrían un comportamiento aceptable en ciertos ambientes agresivos. Y, si simultáneamente a un aumento en el contenido en silicato bicálcico se anula la presencia de aluminato tricálcico, es decir si se entra en el área de los cementos PY, nos encontramos con los cementos portland más fríos que se pueden fabricar, con notable resistencia a ciertos ambientes agresivos.

En resumen (Figura 1 y tabla II):

- *Cemento caliente* (alta resistencia inicial). Silicato tricálcico C_3S . Aluminato tricálcico C_3A .
- *Cemento frío* (mejorada durabilidad). C_2S Silicato bicálcico. C_4AF Ferroaluminato tetracálcico.

El mismo resultado (bajo calor de hidratación) puede lograrse con cualquiera de los cementos portland mezclados con adiciones activas, en proporciones más o menos notorias según el portland que sirve de base (cementos PA, puzolánicos y siderúrgicos).

En *obras hidráulicas, trabajos subterráneos, cimentaciones y obras marítimas*, cabe pensar en dos fenómenos, consecuencia de la inestabilidad, en mayor o menor grado, del conglomerante hidratado: De una parte, la solubilidad de la cal liberada en la hidratación de los silicatos del portland (aguas puras, aguas de lluvia, aguas ligeramente ácidas) y, de la otra, la posible agresividad por parte de sustancias disuel-

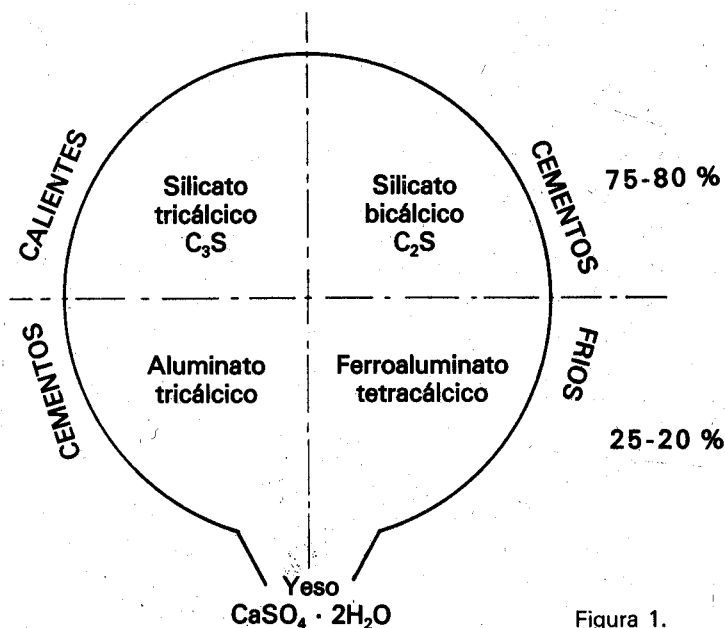


Figura 1.

eso, se han hecho algunas especificaciones para los cementos destinados a ciertos usos, limitando su calor de hidratación.

1.1.3. Resistencias mecánicas

La resistencia global del hormigón viene condicionada por distintas variables, una de las cuales es la naturaleza y distribución de la pasta de cemento, la cual hace que dicha resistencia evolucione con el tiempo.

Dentro del sólido que constituye la pasta hidratada, la fracción más importante en el desarrollo mecánico es la tobermorita (producto de la hidratación de los silicatos cálcicos), que nace en estado de gel, acompañada de los sulfoaluminatos, eminentemente cristalinos, que tienden a crear el esqueleto fundamental, sobre todo en las primeras edades del conglomerante.

Según parece, los primeros colaboran en los esfuerzos a flexotracción y los segundos a los de compresión.

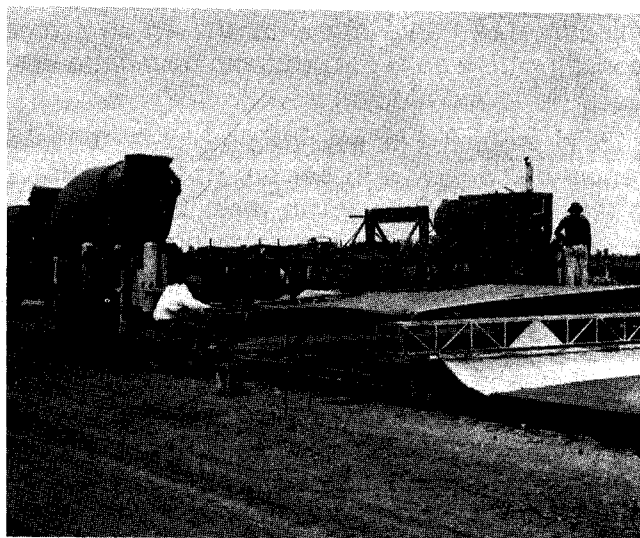
1.1.4. Idoneidad de la aplicación de los diferentes tipos de cementos en obra (2)

El cemento es, como se ha dicho, el ser vivo del hormigón y, por lo tanto, el componente dispuesto a sufrir los efectos de todo lo que le rodea.

Por ello, todos los cementos requieren una serie de precauciones o recomendaciones en su manejo, antes y durante su empleo: Unas de carácter general y otras, más específicas de sus distintos tipos.

Dentro de las *recomendaciones generales* y con respecto a los materiales anhidros, es norma general no emplear ningún cemento recién fabricado, con temperaturas superiores a un cierto límite. También deben tomarse precauciones generales en el almacenamiento, tanto más acusadas cuanto más fino es el cemento o mayor su proporción de portland, caso de tratarse de cementos mixtos.

En la hidratación, todos los cementos tienen tendencia a la *retracción hidráulica*, tanto más acentuada cuanto mayor es su finura. Este fenómeno puede conducir a la fisuración que, en



ciertos casos, puede surgir, incluso en las primeras horas después del amasado. Debe, pues, cuidarse el *curado*, el cual debe ser tanto más prolongado e intenso cuanto más lento sea el endurecimiento del conglomerante (cementos mixtos, tiempo frío y seco, etc.).

Cuando se trata de emplear mezclas de cemento, conviene conocer sus compatibilidades, lo cual es posible en la mayor parte de los casos.

Al tratar de hacer una *recomendación específica* de los cementos, debe de tenerse en cuenta que cada obra se encuentra rodeada de una serie de circunstancias a las que es preciso adaptarse empleando el conglomerante que sea más adecuado a las mismas (carácter del terreno y del ambiente, clases de áridos, condiciones climáticas, tipo de obra, etc.), a la vez que el resto de los componentes del hormigón, sus proporciones y la tecnología empleada sean los más adecuados.

Todos los conglomerantes hidráulicos, salvo los cementos aluminosos, pertenecen a la familia de los silicocalcáreos, por ser sus constituyentes esenciales los silicatos cálcicos.

El primer miembro de esta familia es el cemento portland. Todos los demás (PA, siderúrgicos y puzolánicos) se componen de cemento portland en proporción variable, según los casos, y de otros componentes que de una u otra forma colaboran en el desarrollo hidráulico (escoria granulada de horno alto y puzolana).

La idoneidad de un cemento para una deter-

TABLA I
COMPORTAMIENTO DE LOS CONSTITUYENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO PORTLAND

Constituyente	Velocidad de hidratación	Calor de hidratación	Desarrollo de resistencias	Durabilidad química
C ₃ S	Grande	Grande y rápido 120 cal/g	Rápido y prolongado	Pequeña
C ₂ S	Pequeña	Pequeño y lento 62 cal/g	Lento y muy prolongado	Intermedia
C ₃ A	Muy grande	Muy grande y rápido 207 cal/g	Muy rápido y corta duración	Muy pequeña
C ₄ AF	Grande	Moderado y lento	Poco conocido	Grande

tas hacia alguno de los constituyentes del portland (aguas selenitosas, agua de mar, aguas residuales, atmósferas corrosivas, etc).

En estos casos, y ante posibles eventualidades, deben de excluirse los cementos portland puros y pensar en cementos mixtos, a base de escoria, puzolana, ceniza volante, etc., o, incluso en el propio cemento aluminoso, exento de cal liberada.

Si en estos casos se emplean *elementos prefabricados* (tubos, pilotes, etc.), los peligros de agresividad son menores, puesto que se trata de un hormigón endurecido previamente en el que, normalmente se ha cuidado su preparación (granulometría cuidada, riqueza en cemento, buena compacidad, etc.).

Para *trabajos ordinarios de hormigón*, armado o no, puede considerarse una amplia gama de cementos, desde los portland medios y bajos a los puzolánicos y siderúrgicos con contenido bajo o medio de escoria, pasando por los PA.

Si el cemento se ha de emplear para preparar *elementos de hormigón de gran superficie*, tales como losas, firmes para carreteras y aeropuertos y, en general, elementos laminares, deberán emplearse cementos de débil retracción por secado, ayudados o no con productos de curado. Esta propiedad no se puede relacionar con un tipo o tipos determinados de cemento, aún cuando se conozcan algunas circunstancias que la modifican (finura de molido, porcentaje de aluminato tricálcico, estructura física de las adiciones activas, etc.).

En *prefabricación* suele dominar el empleo de

los cementos portland, sobre todo en la prefabricación pretensada. Si existe algún tratamiento térmico puede incluirse el empleo de adiciones activas, siempre que se reconozca que su incorporación es netamente favorable.

En *albañilería* (enlucidos, morteros de asiento, etc.), juegan papel importante propiedades como la plasticidad, la adherencia y la capacidad de retención de agua, por encima de la capacidad resistente. Pueden emplearse, desde un portland de bajo tipo resistente hasta una cal hidráulica, pasando por los cementos mixtos, de adición o mezclas de ellos.

En el caso de tener que *resistir temperaturas elevadas* (conductos de humos, chimeneas, etc.), los cementos silicocalcáreos tienen una limitación que es más amplia en los cementos puzolánicos (en los portland el límite está en 300-350° C y en los puzolánicos se puede llegar hasta los 1000° C), empleando un árido adecuado. Para temperaturas superiores se emplean ya los llamados hormigones refractarios, cuyo conglomerante idóneo es el cemento aluminoso, tanto más aluminoso y blanco cuanto más temperatura hayan de soportar.

Resumiendo, se puede decir que al pensar en el empleo de cemento para una obra determinada, deben conocerse con detalle todas las circunstancias locales que influyen en su elección.

Con frecuencia se piensa que la única misión del conglomerante es dar resistencia al hormigón. Sin embargo, a veces, la resistencia pasa a segundo término, destacando el interés por otras propiedades, tales como el calor de hidratación, la retracción, la plasticidad, la capaci-

dad de retención de agua, la durabilidad química, la impermeabilidad, etc.

Por eso, nunca se puede decir que un cemento es mejor que otro, si no se conoce su aplicación; a veces, la elección resulta paradójica, por basarse solamente en las propiedades que tradicionalmente se ensayan en un cemento.

1.2. Los áridos (3)

Los áridos cubren la mayor parte del hormigón y sus propiedades afectan características tan importantes como densidad, resistencia mecánica, durabilidad, conductividad térmica, retracción y fluencia.

En la práctica hay pocas ocasiones en que se pueda elegir el árido de una naturaleza y composición adecuados para un trabajo concreto, ya sean naturales rodados o rocas trituradas (no se tienen en cuenta los áridos especiales).

Afortunadamente hay áridos como los *basaltos*, *granitos* y *pórfidos* que pueden usarse para casi todo. Normalmente, son buenos para hormigones de alta resistencia, con gran resistencia a la abrasión y buena resistencia al deslizamiento. Resisten bien las inclemencias del tiempo y los hormigones con ellos preparados cierran bien con relativa facilidad (4).

La *caliza* también se usa mucho, y es particularmente ventajosa como árido en hormigones, por su buena resistencia al fuego y bajo coeficiente de dilatación térmica, produciendo hormigones fáciles de cerrar. No obstante, producen hormigones menos resistentes al deslizamiento.

Las calizas, por otra parte, pueden reaccionar con diversos agentes agresivos: Aguas de terrenos pantanosos (ácidas) y aguas blandas o puras (neutras o ácidas), que contienen cantidades significantes de CO_2 libre disuelto. No presentan problemas con las aguas de dureza media o alta. En el ataque influye mucho la compacidad o porosidad de la propia piedra.

Ciertas calizas magnesianas, que tienen una buena proporción de sílice incluida en la red cristalina (> 5 por 100), pueden ser atacadas por los álcalis del cemento y separar el magnesio (desdolomitización). Es una forma de reac-

ción árido-álcali, donde la parte reactiva es sílice.

La *forma y textura superficial* de las partículas del árido y su *granulometría* son factores importantes al diseñar mezclas de hormigón y que afectan fundamentalmente su trabajabilidad y resistencia.

Así, los áridos angulosos tienden a producir hormigones que son ásperos y difíciles de trabajar o que requieren mayor proporción de árido fino en las mezclas. La magnitud de este efecto viene dada por el porcentaje de huecos de áridos monogranulares de formas redondeadas o angulares compactados de forma similar; los primeros dan un porcentaje de 34 por 100, en tanto que los segundos lo dan de 41 por 100 (se necesita mayor porcentaje de mortero en el segundo caso). Por eso, los áridos lajosos y aciculares deben evitarse en la práctica.

En cuanto a *granulometría*, la mayoría de los hormigones contienen áridos de 20 mm, de tamaño máximo, con gradación descendente hasta partículas de 75 μm . No obstante, con frecuencia se usan tamaños máximos de 40 mm y 10 mm, incluso hasta de 150 mm, y más para hormigonado en grandes masas.

En general, los hormigones más económicos se hacen empleando el tamaño máximo posible compatible con las características de la obra, ya que esto reduce la dosificación de cemento requerida. Las limitaciones se deben a:

- El tamaño de la sección a moldear, que debe ser, por lo menos, cuatro veces el tamaño máximo del árido.
- El recubrimiento de armaduras, que no será menor que el tamaño máximo o, incluso, mayor, si el árido es permeable.
- Las limitaciones en el diseño de la estructura armada.
- Las disponibilidades económicas de áridos adecuados.

En la producción de áridos se crea una mezcla de tamaños que se suele llamar «todo uno». Esto puede emplearse tal cual si se preparan hormigones donde no es importante precisar sus propiedades. Sin embargo, para hormigón estructural, el árido se clasifica en, al menos, dos partes: grueso y fino (< 5 mm = arena). Si, a su vez el control es más severo, el árido

grueso se clasifica en tamaños más monogranulares: 40-20, 20-10, 10-5, por ejemplo. Incluso, la arena se suele subdividir en algunos casos: 5-2,36, 2,36-1,18, etc.

La granulometría del árido fino (arena) es de capital importancia en las propiedades del hormigón, variando sus proporciones en las mezclas de forma que a mayor finura menor proporción. Las normas establecen valores idóneos en cada caso.

El árido fino influye, según su origen y procedencia, en las *necesidades de agua*, dependiendo de un complejo de factores entre los que destacan: la forma de partícula, la textura superficial y su distribución granulométrica.

Algunos áridos pueden reducir la *durabilidad* del hormigón, por crear excesiva retracción, por ser heladizos o por ser reactivos con los álcalis del cemento, como se ha citado anteriormente.

En las *Instrucciones* para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa, armado y pretensado (5, 6), se especifican con detalle:

- En cuanto al cemento, los tipos, según el RC-75 (7), aplicables en cada caso, así como los contenidos mínimo y máximo en el hormigón y las posibles limitaciones o precauciones.
- En cuanto a los áridos, las limitaciones en el tamaño máximo según las características dimensionales de la obra y tipo y situación de las armaduras, las limitaciones en el coeficiente de forma y las limitaciones en el contenido de sustancias consideradas nocivas, en cada caso.

1.3. El agua

En cuanto al agua, como tercer componente del hormigón, basta señalar lo dicho en las Instrucciones antes mencionadas, que se resume del siguiente modo:

- Son válidas las aguas sancionadas por la práctica.
- En caso contrario, se exigen unos requisitos o limitaciones.
- En hormigón en masa puede emplearse agua de mar o análogas para el amasado.
- En hormigón pretensado se limita el contenido de cloruros.

En los hormigones tiene especial importancia la proporción de agua en relación con el cemento (*relación A/C*) y de ello se tratará más adelante.

1.4. Los aditivos

En los últimos años se ha generalizado el empleo de aditivos, *cuarto componente* del hormigón, llegando a utilizarse en más del 80 por 100 del hormigón total producido.

Su empleo racional en hormigones a base de cemento mejora alguna de sus propiedades y hace a estos materiales más competitivos, tanto técnica como económicamente.

Representan un elemento auxiliar importante en la tecnología del hormigón y de ellos existen tratados muy completos (8, 9, 10).

2. HORMIGONES EN FUNCION DEL TIPO DE OBRA

2.1 Generalidades (3)

Como criterio general, el hormigón en estado plástico debe ser *trabajable*, de forma que pueda colocarse y compactarse adecuadamente con los medios disponibles. Su total compactación es esencial para que el hormigón sea durable y se logre la resistencia y otras propiedades mecánicas adecuadas.

Una vez endurecido, el hormigón debe cum-



plir uno o más requisitos funcionales, entre otros: resistencia, durabilidad, resistencia al fuego, aislamiento térmico, etc.

La *resistencia a compresión* del hormigón depende, en gran medida del tipo de árido. Así, un árido ligero no es adecuado para hormigones de muy alta resistencia, los cuales, a su vez, se producen más fácilmente con árido de rocas trituradas que con árido rodado.

Hay casos, como en las losas de firmes blancos para carreteras, en que la *resistencia a tracción* indirecta del hormigón es más importante que la resistencia a compresión. Esto se logra mejor con árido triturado que con árido rodado.

Otras propiedades mecánicas del hormigón, como el *módulo de elasticidad* y la *fluencia*, dependen en gran medida del árido.

En *durabilidad* destacan, como se detallará más adelante, la protección de las armaduras contra la corrosión, la resistencia al hielo y la resistencia al ataque químico. En todos los casos es fundamental preparar un buen hormigón, bien compactado y adecuadamente curado.

En cualquier caso, tanto los cementos como los áridos, son importantes en relación con la resistencia mecánica y la durabilidad. Hay otras propiedades, como la protección contra el fuego y el aislamiento, que dependen casi exclusivamente del árido empleado. En circunstancias especiales se precisa una combinación de tipos de cemento y árido para preparar un hormigón con propiedades muy específicas (caso de los hormigones refractarios, por ejemplo).

2.2. Hormigón estructural

El hormigón ordinario, en masa o armado, para obras de carácter general, es decir, sin ninguna característica específica, es objeto de múltiples tratados, en lo que se refiere a dosificación, preparación, colocación, etc (11, 12, 13), y no puede ser objeto de este trabajo por su limitada extensión.

En lo sucesivo sólo se tratarán con cierto detalle los hormigones para obras que pueden representar modelos característicos (grandes masas, alta resistencia, ambientes agresivos) y los hormigones para aplicaciones especiales (con árido ligero, con árido pesado, refractarios y armados con fibras).

2.3. Hormigón en grandes masas

En las obras donde se han de emplear grandes masas de hormigón, deben de recordarse las indicaciones señaladas en 1.1.4.2, acerca de los cementos, habida cuenta de que en este caso priman aspectos tales como el calor de hidratación, la retracción y la consecuente fisuración de origen térmico (14).

Se utilizará, *cementos PA* en lugar de P, incluso de bajo tipo resistente (PA-350); si las circunstancias lo permiten es preferible emplear cementos de otro tipo distinto del portland y, en particular, los cementos puzolánicos (PUZ-I y PUZ-II), sobre todo si concurren aspectos de durabilidad frente a acciones químicas por aguas puras, ácidas o carbónicas agresivas.

En el hormigón en grandes masas se usa un tamaño máximo de *árido* grande (entre 75 y 150 mm), lo que permite reducir considerablemente el contenido de cemento en comparación con los tamaños máximos más convencionales de 20 y 40 mm, manteniendo resistencias y trabajabilidad comparables.

Los grandes tamaños de árido hacen que el hormigón sea más propenso a la segregación. Esta tendencia se suele controlar incorporando polvo de roca triturada (filler) u otras adiciones (arena natural fina, ceniza volante, puzolana molida) o aditivos (oclusores de aire, plastificantes) que mejoran la cohesividad e, incluso, otras propiedades como la durabilidad y la resistencia al hielo-deshielo.

Las *relaciones árido/cemento* están generalmente comprendidas entre 6 y 9 en peso para áridos de 75 mm y entre 8 y 15 para áridos de 150 mm.

La *relación A/C* oscila de 0,5 a 0,7.

El contenido de agua es el principal responsable en la retracción por secado, lo que obliga a preparar el hormigón con la menor relación A/C posible. Esto, unido a una buena compactación y un buen curado, hace que se consiga una baja permeabilidad, lo cual es frecuentemente necesario en este tipo de obras (presas, por ejemplo).

Una falta de *impermeabilidad* suele ser más consecuencia de la fisuración que de la propia permeabilidad del material, fisuración motivada

por tensiones en el hormigón, a causa de: Cambios de temperatura en las primeras edades (calor de hidratación del cemento), cambios de temperatura consecuencia de condiciones ambientales distintas, retracción por secado y carga.

El primer factor es el más importante, debiéndose controlar la elevación de temperatura debida al calor de hidratación. Los medios usuales son: Emplear un contenido de cemento lo más bajo posible compatible con las resistencias necesarias, tamaño máximo del árido grande, empleo de reductores de agua o sustitución de cemento por puzolana o ceniza volante, como ya se ha dicho. Ciertos aspectos de la obra en sí también pueden reducir la elevación de temperatura: tongadas no muy espesas, enfriamiento del hormigón fresco, etc.



2.4. Hormigón de alta resistencia

En un hormigón ordinario se supone que la resistencia a compresión del hormigón, totalmente compactado, se relaciona con la relación A/C y es independiente, tanto de la relación árido/cemento como del tipo de árido empleado. En hormigones de resistencias relativamente bajas, el efecto de estos supuestos puede ignorarse; sin embargo, para resistencias superiores a 400 kp/cm² debe tenerse en cuenta su influencia.

Para unos materiales y una relación A/C dada, la resistencia del hormigón tiende a aumentar al crecer la relación árido/cemento, es decir, al disminuir el contenido de cemento; un cambio en la relación árido/cemento de 0,5 a relación A/C constante, tendrá efectos similares a un cambio en la relación A/C de 0,01, para una relación árido/cemento constante. Cambios de estas proporciones originan, naturalmente, un cambio en la trabajabilidad del hormigón.

Un intento de aumentar la resistencia del hormigón ajustando las proporciones de árido, cemento y agua, manteniendo constante la trabajabilidad, demuestra que debería reducirse la relación A/C, pero para esto es necesario reducir la relación árido/cemento; esto, de paso, tiende a reducir la resistencia, aunque en menor extensión que el aumento original. Así, hay un límite para el que la resistencia del hormigón,

a trabajabilidad constante, puede aumentarse, alterando simplemente las proporciones de los constituyentes (15).

En la práctica, muchos hormigones de alta resistencia son hormigones de bajo asentamiento o asentamiento nulo, para uso en productos prefabricados donde se emplean métodos especiales de colocación. Estos hormigones no pueden prepararse en central, por dificultades de descarga, si no se modifica su consistencia con el uso de aditivos adecuados.

Al tratar de los componentes de estos hormigones, la elección del *tipo de cemento* es, probablemente, el factor más importante. Esta selección debe hacerse sobre la base de la capacidad resistente a distintas edades: Hay cementos que producen muy alta resistencia a edades tempranas, pero mejoran poco su resistencia a más largo plazo. Esto va muy unido a la finura de molienda. Por eso, para producir hormigones de alta resistencia a edades superiores a 28 días, deben de emplearse cementos a los que, por un lado, se limite la finura máxima (4.000 cm²/g Blaine, por ejemplo) y, por otro, se exija una resistencia mínima a corta edad (3 ó 7 días). Estos cementos pertenecen a categorías resistentes elevadas (P o PA 450 y 550, según RC-75).

En cuanto a los *áridos*, debe de considerarse mucho la forma, la textura superficial y su

mineralogía. Esto afecta a las necesidades de agua y controla la adherencia árido/pasta, de gran trascendencia en las calidades resistentes.

En cuanto a los *finos*, como los hormigones de alta resistencia contienen una cantidad de cemento (a veces con adición activa) más bien alta, las arenas con módulo de finura alto ($> 3,0$), que en condiciones normales se consideran gruesas, dan la mejor trabajabilidad y las resistencias a compresión más altas.

La *relación A/C* se debe encontrar entre 0,3 y 0,4.

El empleo de *aditivos* reductores de agua, casi siempre necesarios, permiten incluso reducir el contenido de cemento y el efecto térmico consecuente, sin merma de las cualidades resistentes.

2.5. Hormigón en ambientes agresivos

2.5.1. Generalidades

La durabilidad es un término general que, aplicado al hormigón, significa la aptitud del material para cumplir las funciones a través de la vida de la estructura en la que se ha de emplear, sin pérdida de resistencia o aspecto.

Los mecanismos por los que el hormigón puede no llegar a ser durable son muchos. En la práctica se consideran tres: Resistencia a la helada, agresión química y abrasión, con matizaciones más o menos precisas. A veces, independientemente de estos mecanismos, el hormigón puede mostrar ser más o menos durable en función de las condiciones ambientales en que se encuentra: Húmedo o seco, frío o calor, condiciones estáticas o cambiantes, etc. Por eso, al hablar de durabilidad, debe precisarse el tipo de ataque y las condiciones ambientales en que se encuentra el hormigón.

Hay varios aspectos importantes de la durabilidad que se relacionan con la *permeabilidad del hormigón*. Esta es de capital importancia cuando existe la posibilidad de penetración de fluidos (gases ó líquidos) potencialmente agresivos.

Dentro de la estructura de la pasta de cemento hidratada, aparte de los *poros del gel*, que

son muy finos ($\varnothing \sim 0,015 \mu$) y, virtualmente impermeables, existen los *poros capilares*, bastante mayores ($\varnothing \sim 5 \mu$) y, que pueden llegar hasta el 40 por 100 en volumen de la pasta, dependiendo de la relación A/C empleada y de la amplitud de la hidratación. Aparte existen huecos mayores (considerados como aire ocluido), cuya presencia en exceso es consecuencia de una mala compactación del hormigón.

Para obtener baja permeabilidad, lo más importante es el volumen de los poros capilares, consecuencia directa de la relación A/C. En la figura 2, se muestran las variaciones del coeficiente de permeabilidad, para un determinado cemento, en función de la relación A/C. Cambios en la composición del cemento o en su finura, tienen un efecto relativamente pequeño sobre dicho coeficiente en comparación con la relación A/C. Como dato importante del gráfico debe señalarse el rápido incremento de la permeabilidad para relaciones A/C superiores a 0,55.

A su vez, la permeabilidad se reduce con la edad, al progresar la hidratación de la pasta (bloqueo de los poros capilares), como se observa en la figura 3, y lo que demuestra la importancia del curado.

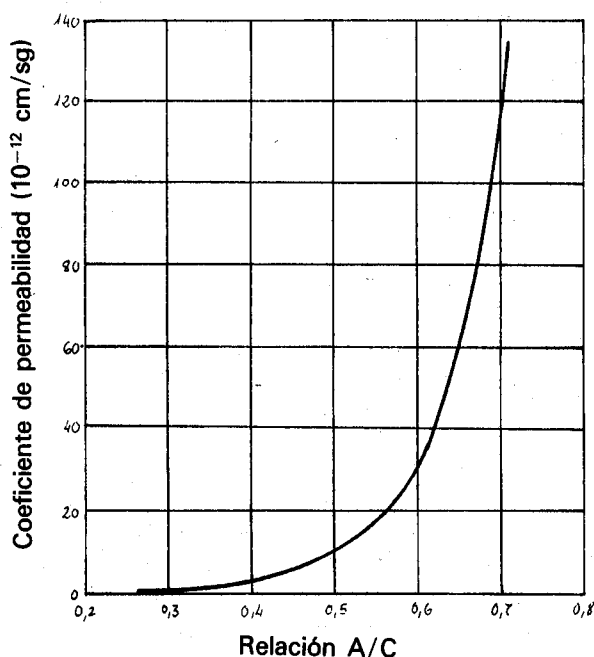


Figura 2. — Relación entre la permeabilidad y la relación A/C en pasta hidratada.

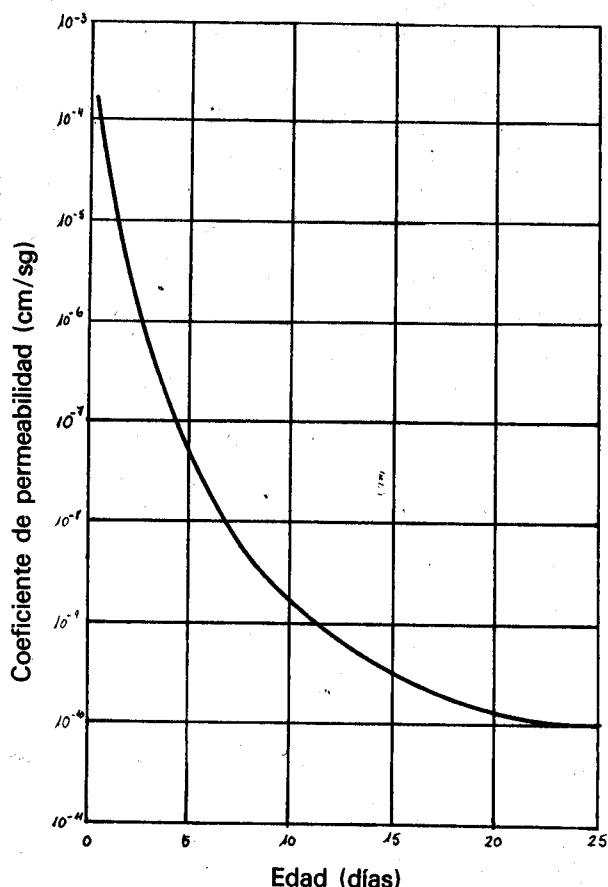


Figura 3.—Reducción de la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada con la edad (A/C = 0,7).

En resumen, *relación A/C* y *grado de hidratación* son factores prioritarios al considerar la *permeabilidad del hormigón*. En la tabla II se muestra la edad del hormigón a la que quedan bloqueados los poros capilares, en función de la relación A/C (16).

TABLA II

Relación A/C	Edad de bloqueo de poros capilares
0,4	3 días
0,45	7 días
0,5	14 días
0,6	6 meses
0,7	1 año
0,7	Infinito

2.5.2. Protección de las armaduras

El agua y el vapor de agua se absorben fácilmente por el hormigón; la superficie puede car-

bonatarse por el CO_2 atmosférico; a través del hormigón pueden penetrar contaminantes tales como el SO_2 ; los ciclos de humedad-sequedad, combinado con hielo-deshielo, pueden provocar roturas superficiales, etc. A todos estos factores, de los que uno a uno son poco importantes, debe añadirse el más importante: El hormigón debe dar protección al hierro para armar y pretensar.

Para mantener bien el hierro debe excluirse el aire y la humedad pero, como esto no es posible, deberá existir suficiente cemento para proporcionar el entorno alcalino preciso para mantener la pasividad del acero.

En primer lugar, el hormigón debe contener *suficiente cemento* para evitar excesiva permeabilidad y proporcionar adecuada alcalinidad y, en segundo lugar, debe de asegurar *espesor de cobertura* adecuado (de interés por la fisuración), que puede conducir a la agresión directa de la armadura a través de las grietas.

En hormigón pretensado se recomienda, en general, mayor dosificación de cemento que en armado, tanto más cuanto menor es el tamaño máximo (Tabla III).

2.5.3. Sulfatos en suelos y aguas subterráneas

A consecuencia de la reacción disruptiva entre los sulfatos en solución y el C_3A hidratado del cemento, también es necesario limitar la *permeabilidad del hormigón*, en proporción a la concentración de sulfatos. Con concentraciones de sulfatos crecientes se precisa emplear *cementos más resistentes* a los mismos, es decir, un PY (contenido limitado de C_3A), un mixto (con contenido creciente de adición) o, incluso, un cemento aluminoso.

Las recomendaciones para el tipo y contenido mínimo de cemento y la relación A/C máxima, se dan en la Tabla IV (17).

Deben de precisarse las *condiciones locales* porque, por ejemplo, un agua fluyente es más agresiva que un agua estática; una diferencia de presión de agua en los lados de una estructura también es más grave que una equipresión, etc.

ADECUACION DE LOS HORMIGONES A LAS NECESIDADES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE OBRAS

TABLA III
EXIGENCIAS PARA ASEGURAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGON
EN LAS CONDICIONES DE EXPOSICION INDICADAS
 (Arido de 20 mm tamaño máximo)

Condiciones de exposición	Limitaciones en el hormigón	Hormigón armado				Hormigón pretensado				Hormigón en masa		
		Cobertura nominal de hormigón no menor de				Cobertura nominal de hormigón no menor de				Rel. A/C no mayor de	Cont. cemento no menor de	Tipo mínimo hormigón
Medias Moderadas Severas Muy severas	Relación A/C no mayor de Cont. cemento (kg/m³) no menor de Tipo mínimo de hormigón	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		kg/m³	
		20	20	15	15	20	15	15	15	0,8	180	C15
			30	30	25		30	25	20	0,7	250	C25 (A)
			40	35	30		35	30	25	0,6	300	C30 (B)
					60			60	50	0,45	300	C40
		Hormigón				Hormigón						
		(A)	(B)	(C)		(B)	(C)					
		0,7	0,6	0,5	0,4*	0,6	0,5	0,4*	0,4*			
		250	300	350	350	300	350	350	350			
		C25	C30	C35	C40	C30	C35	C40	C50 y sup.			

* Para lograr esta relación A/C, puede ser necesario el empleo de aditivos.

TABLA IV
EXIGENCIAS PARA EL HORMIGON EXPUESTO AL ATAQUE POR SULFATOS

Grado de agresividad	Concentración sulfatos (expres. SO ₃)			Exigencias de mezcla para hormigón normal totalmente compactado				
	En suelos***		En aguas subterráneas***	Tipo de cemento	Contenido mín. cemento (kg/m³) para tamaño máximo árido de			Relación A/C máx.
	Total SO ₃ %	SO ₃ extracto agua/suelo 1:1 g/l	g/l		40 mm	20 mm	10 mm	
1	< 0,2	< 1,0	< 0,3	PA ó P H.M.* H.A.**	230 270	250 300	330 370	0,70 0,60
2	0,2-0,5	1,0-2,5	0,3-1,2	P ó PA PUZ-I, PUZ-II, S-I, S-II, S-III PY	290 260 240	330 310 280	380 350 330	0,50 0,55 0,55
3	0,5-1,0	2,5-5,0	1,2-2,5	S-III, PUZ-I, PUZ-II PY CA	230 290 290	380 330 330	420 380 380	0,45 0,50 0,45
4	1,0-2,0	5,0-10,0	2,5-5,0	PY CA	330 300	370 340	420 410	0,45 0,40
5	> 2,0	> 10,0	> 5,0	PY + capa protectora ó CA	330	370	420	0,35

* Hormigón en masa.

** Hormigón armado.

*** Estas recomendaciones son para hormigón en aguas aproximadamente neutras.

2.5.4. Agua de mar

Una buena calidad de hormigón resiste bien el agua de mar a pesar de que, en teoría, los ataques por sulfatos deben de ocurrir de modo similar a los de las aguas en obras terrestres. Esto se debe a que, en el mar, los compuestos expansivos son deslavados antes de producir la expansión. No obstante, las circunstancias deben considerarse como «severas» a la hora de dosificar el hormigón (Tabla IV).

2.5.5. Ácidos y álcalis

El hormigón de cemento portland es esencialmente alcalino, estable en el intervalo de pH de 7 a 12,5. Si se emplean cementos puzolánicos, y como consecuencia de la fijación de la cal liberada por parte de la puzolana, la estabilidad puede ampliarse hasta pH 5.

En caso de preverse un posible ataque ácido, deben emplearse áridos silíceos.

El hormigón de cemento aluminoso tiene mejor resistencia y puede emplearse en el intervalo de pH de 4 a 12, excluyendo, lógicamente, ácidos minerales y álcalis cáusticos.

En todos estos casos, el hormigón debe prepararse lo más denso que sea posible, empleando baja relación A/C y buen curado. Con ácidos fuertes, incluso con el acético, todos los hormigones con cementos hidráulicos, deben protegerse con una pantalla hecha generalmen-

te de productos orgánicos (resinas, bituminosos, etc.).

3. HORMIGONES DE CARACTERISTICAS ESPECIALES

3.1. Hormigones ligeros

La reducción de densidad en el hormigón se lleva a cabo, siempre, incorporando aire en el mismo, por una variedad de métodos. En la tabla V se señalan aquellos que, normalmente, se emplean para hormigones con fines estructurales (4).

3.1.1. Hormigón con árido ligero

Se considera como árido ligero aquél cuyo peso específico es inferior a 1,150 kg/m³ y como hormigón con árido ligero aquél que tiene un peso específico inferior a 1.600 kg/m³ (18).

Entre los áridos ligeros más corrientes se encuentran:

- Escoria de horno alto dilatada.
- Piedra pómez.
- Arcilla y pizarra expandidas.
- Cenizas volantes sinterizadas, con densidades máximas en árido grueso (> 3 mm) de 800 a 950 kg/m³ y de 1200 kg/m³ en árido fino (< 3 mm).

Las propiedades de los hormigones hechos con árido ligero dependen, no sólo de la naturaleza del árido, sino también de factores tales como su granulometría, proporción de cemento, relación A/C y grado de compactación, los cuales son muy variados según el uso a que se desea destinar.

Los principios generales de *dosificación* de hormigones de árido normal pueden aplicarse a los hormigones de árido ligero; sólo se requieren modificaciones si los áridos son muy absorbentes.

Un aspecto importante de estos hormigones es su *trabajabilidad*. La angularidad y la rugosidad superficial de muchos áridos ligeros conduce a una mala trabajabilidad de las mezclas. Muchas veces, para conseguir un suficiente grado de compactación en obras moldeadas in si-

TABLA V

Situación del aire en el hormigón	Descripción general
Aire contenido en las partículas del árido.	Hormigón de árido ligero totalmente compactado.
Aire contenido entre las partículas del árido.	Hormigón de árido normal sin finos. Hormigón de árido normal parcialmente compactado para bloques.
Aire contenido tanto en, como entre, las partículas de árido.	Hormigón árido ligero sin finos. Hormigón árido ligero parcialmente compactado para bloques.
Aire u otro gas contenido en mortero de cemento.	Hormigón aireado.

tu, es necesario mejorar esta trabajabilidad aumentando la dosificación de cemento o añadiendo arena u otros áridos finos normales. También puede mejorarse, sin aumentar su peso, incorporando oclusores de aire (aireantes).

En sus aplicaciones se busca un compromiso entre densidad, aislamiento térmico y resistencias mecánicas, propiedades siempre interdependientes.

Destacan como aplicaciones, la preparación de bloques y paneles prefabricados y como relleno con fines aislantes.

También se prepara hormigón ligero estructural que, con una resistencia adecuada, reduce el peso muerto aproximadamente $1/3$ y mejora el aislamiento térmico y la resistencia al fuego. En este caso, se emplean mezclas más ricas en cemento y se hace la mezcla más trabajable para lograr mejor compactación para cubrir, adherir y proteger mejor las armaduras.

3.1.2. Hormigón de árido normal sin finos

Los materiales usados en estos hormigones son, generalmente, *cemento*, portland o PA ordinarios y un *árido* grueso monogranular (40-20 ó 20-10 ó 10-5 mm). Si es muy ancho el espectro de tamaño del árido habrá menos contenido de huecos en el hormigón compactado y se reducirá el objetivo primario del hormigón sin finos.

Las proporciones de cemento, árido y agua se elegirán de forma que las partículas del árido en el hormigón fresco estén recubiertas con una capa de pasta que se adhiere al árido, haciendo que éste tenga contactos que aseguren su aglomeración cumpliendo las exigencias resistentes, sin que los huecos entre las partículas del árido queden bloqueados con pasta de cemento.

Las *proporciones de mezcla* más apropiadas se determinarán, en parte, por experimentación y, en parte, sobre la resistencia a compresión precisada. Las experiencias son necesarias para fijar bien la *relación A/C*, que puede conducir a pastas muy secas para recubrir el árido bien o pastas muy fluidas que escurran demasiado.

Al estar limitada, pues, la relación A/C a un

«valor óptimo», fijado el cemento hay un sólo valor de dicha relación para cada tipo y tamaño de árido.

La *relación árido/cemento*, lógicamente, es tanto más baja cuanto más pequeño es el huso granulométrico empleado.

Estos hormigones se compactan por apisonado y no por vibrado.

3.2. Hormigones de alta densidad (Hormigones pesados) (4)

Este término puede significar que el hormigón ha sido cuidadosamente compactado al máximo de posibilidades y que se ha excluido todo el aire. Un significado más importante es que, independientemente de lo anterior, la densidad del hormigón sea lo más elevada posible, de manera que se logre mayor *resistencia a la penetración por radiaciones*, en general.

El componente de más baja densidad del hormigón es la pasta de cemento y oscila de 1,7 a 2,1, dependiendo de la relación A/C. Como los áridos naturales normales tienen densidades mayores que la pasta, con una total compactación, las máximas densidades se obtendrán con mezclas de relación A/C lo más baja posible y relación árido/cemento lo más alta posible. Es decir, en la medida que sea posible, áridos de tamaño máximo grande y baja trabajabilidad.

Las densidades normales alcanzadas en un hormigón de 300 kg de cemento/m³ y relación A/C = 0,6 oscilan de 2.300 a 2.650 kg/m³ en húmedo y de 2.175 a 2.530 kg/m³ en seco.

Para lograr mayores densidades hay que emplear *áridos especiales*, tales como barita, ilmenita, hematíes, magnetita, perdigones de acero, láminas perforadas o perdigones de plomo. En la tabla VI se indican las densidades obtenidas, en hormigón, con algunos de estos materiales.

Al preparar hormigones de alta densidad, los constituyentes son más propensos a la segregación que en los hormigones con áridos normales. Esto significa que, en la práctica, deben prepararse hormigones de *baja trabajabilidad*.

Además, los hormigones preparados con barita, lo cual es frecuente, no ganan resistencia

TABLA VI

Tipo de árido	Densidad aprox. árido (T/m ³)	Densidad aprox. hormigón fresco (kg/m ³)
Barita gruesa (con árido fino densidad normal)	4,0	3.000
Barita gruesa y fina .	4,0	3.300
Perdigones o láminas acero (con árido fino densidad normal) ...	7,8	4.800
Perdigones de plomo (con árido fino densidad normal)	11,4	7.000

con la edad de la misma forma que los hormigones convencionales. Son más lentos, pero esto no es inconveniente porque estos hormigones se emplean generalmente en secciones grandes que no estarán sometidas a grandes esfuerzos a corto plazo.

Es delicado el empleo de *aditivos*, pues debe evitarse a toda costa la posible oclusión de aire. No obstante, los superplastificantes, bien empleados, son interesantes.

3.3. Hormigones refractarios (19)

El hormigón ordinario tiene un buen comportamiento a altas temperaturas en períodos cortos de tiempo, como ocurre en un incendio o fuego accidental; esto es aplicable, particularmente, si el hormigón está preparado con árido calizo o árido ligero.

Sin embargo, en aquellos casos en que el hormigón ha de someterse deliberadamente a temperaturas altas sostenidas o a cambios bruscos de las mismas, como puede ocurrir en ciertas aplicaciones domésticas o industriales, deben tenerse muy en cuenta las propiedades del cemento, de los áridos y, por supuesto, del hormigón resultante.

Así, ciertos áridos silíceos sufren una fuerte expansión a temperaturas a partir de 250° C, lo que les hace inadecuados si se prevé superar esta temperatura. Los áridos calizos, sin embargo, pueden emplearse hasta unos 500° C. El ladrillo de arcilla cocida triturado es un árido aceptable para hormigones que han de someterse a

temperaturas de hasta 1.000° C. Por encima de esta temperatura se precisan ya áridos especialmente refractarios, utilizables hasta temperaturas que pueden alcanzar los 1.800° C.

En cuanto a los *cementos*, al ser hidráulicos, todos sufren, como tales, una pérdida de resistencia, al perder su agua combinada con la elevación de temperatura.

Por eso, es usual limitar la aplicación de los hormigones de cemento portland a aquellos casos en que la temperatura sostenida no pasa de 300° C, ya que, más adelante, surge la formación de cal libre y una fuerte retracción; la presencia de adiciones como la puzolana, con áridos adecuados, permite llegar hasta 1.000° C.

Los hormigones con *cemento aluminoso* no tienen estas limitaciones y así, el cemento aluminoso gris (alto en óxido de hierro) puede emplearse para preparar hormigones refractarios que pueden soportar hasta 1.300-1.350° C y el cemento aluminoso blanco, con áridos refractarios artificiales especiales, puede llegar a soportar hasta 1.800° C.

En principio, la *composición granulométrica* de los hormigones resistentes a altas temperaturas no es diferente de la de los hormigones ordinarios. La diferencia reside, solamente, en la adición del *estabilizador cerámico* bajo forma del polvo fino (0-0,060 mm) a razón de 30 por 100, al menos, del peso del cemento (19).

La *dosificación de cemento* debe ser alta (400-450 kg/m³) y la *relación A/C* más bien baja (0,35-0,40).

En cuanto al modo de proceder, se aconseja mezclar separadamente el cemento y el estabilizador y mojar previamente los áridos.

El primer calentamiento del hormigón endurecido es importante para su comportamiento ulterior. En una primera fase, se calienta lentamente hasta 150° C y se deja secar a esta temperatura varios días. En una segunda fase, el calentamiento se continúa lentamente hasta la temperatura de servicio.

3.4. Hormigones armados con fibras (20, 21)

El empleo de sistemas con la incorporación de fibras permite la producción de elementos de

TABLA VII

Tipo de fibra	Aplicación
Acero	Capa superior de pavimentos, losas de puentes, tubos de hormigón, pistas de aeropuertos, recipientes para trabajar a presión, estructuras resistentes a voladuras, cimentaciones de maquinaria, estructuras marinas, revestimiento de túneles, construcción de cascos de barco.
Vidrio	Paneles prefabricados, muros-cortina, tubos para desagües, cubiertas laminares.

construcción de dimensiones mínimas reducidas, con resistencias a flexión y al impacto notablemente mejoradas.

Hay numerosos tipos de productos, con base cemento, armados con fibras, y sus aplicaciones son muy variadas.

En la tabla VII se dan posibles aplicaciones para las fibras más frecuentes. La mejor resistencia a flexión permite una reducción de espesores y el incremento de la resistencia al impacto permite controlar más y mejor el proceso de fisuración.

No se incluyen las aplicaciones de fibras de materiales plásticos, asbesto, carbono y productos vegetales.

A continuación se tratará sólo el tema de las fibras de acero (22).

Al pensar en el proyecto de mezclas de hormigón con fibras de acero, lo primero que hay que tener en cuenta es la reducción de su *trabajabilidad* por la geometría y desarrollo superficial de las fibras. Por esta gran superficie y la necesidad de su buena envoltura, los hormigones con fibras necesitan una *mayor proporción de material fino* (cemento y arena) que los hormigones convencionales; si éstos contienen de 25 a 35 por 100 de mortero sobre el volumen total del hormigón, los hormigones con fibras requieren de 35 a 45 por 100, de acuerdo con la geometría y volumen de fibra incorporada. A mayor volumen de fibra y mayor aspecto (relación longitud/diámetro), más baja será la trabajabilidad y mayores las necesidades de pasta.

Para mejorar las propiedades cohesivas de la matriz, además del *cemento* (que puede seleccionarse según las recomendaciones dadas en 1.1.4) pueden incorporarse cenizas volantes,

que facilitan la trabajabilidad y permiten reducir el agua de amasado.

En estos hormigones debe controlarse la cantidad de *árido* grueso y su tamaño máximo, ya que un exceso provoca una aglomeración de la fibra haciendo intrabajable la masa.

En general, se limita el tamaño máximo del árido a 10 mm. La relación de árido fino a árido grueso suele variar de 1:1 a 3:1.

La *relación agua/cemento* oscila de 0,5 a 0,6.

Pueden emplearse sin inconveniente *aditivos* ocluidores de aire, modificadores de fraguado, reductores de agua o plastificantes.

Generalmente, es difícil preparar buenas mezclas con más de 4 por 100 de *adición de fibra* en volumen, siendo usual no pasar del 2 por 100. Las fibras que se utilizan con más frecuencia miden de 0,4 a 0,5 mm $\varnothing \times 25$ a 50 mm., de longitud.

Por sus características, suele requerirse más energía para compactar el hormigón con fibras que el hormigón convencional. En cuanto al tipo de compactación es preferible la vibración externa sobre el encofrado a la vibración interna.

Los medios, equipos y procedimientos convencionales son suficientes para el vertido y acabado del hormigón armado con fibra de acero.

Entre las propiedades de estos hormigones destacan:

- Mejor *resistencia a flexión*, evitando la rotura por fragilidad y mejorando el control de la fisuración (el aumento de resistencia a la flexión es de 2,5 a 3 veces la del hormigón sin fibras).

Más notoria es su superioridad en relación a los hormigones convencionales, en la absorción de energía y su *resistencia al impacto* y a las cargas explosivas.

- Mejor resistencia al fuego y al choque térmico.
- Mejor resistencia a la abrasión y a la erosión.
- Mayor resistencia a la fatiga y al desgarramiento.
- Buena resistencia a los ciclos de hielo-deshielo.

4. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES CLIMATICAS EN LA ADECUACION DE LOS HORMIGONES EN OBRA

Cuando las condiciones ambientales son un tanto extremas, se puede crear problemas en la fabricación, transporte colocación y curado del hormigón, que pueden afectar de modo adverso las propiedades y condiciones de servicio del producto resultante. Ello obliga, en primer lugar, a considerar los materiales a emplear, su dosificación y precauciones en la fabricación.

4.1. Hormigonado en tiempo frío (23, 24)

Como tiempo frío se define (según el Manual del American Concrete Institute) aquél en que, durante más de tres días sucesivos, la temperatura media diaria cae por debajo de 4,5° C.

El hormigón se afecta notablemente con el frío en sus características esenciales, retardándose las reacciones de fraguado y endurecimiento del cemento (Tabla VIII); no obstante, debe señalarse que, a pesar del frío, el hormigón recupera progresivamente con el tiempo sus resistencias normales, siempre que la temperatura no haya bajado de 0° C. Por el contrario, si el hormigón se ha helado, la recuperación no es posible.

Con temperaturas negativas el agua se hiela en los poros del hormigón y puede provocar, por su aumento de volumen (10 por 100 aproximadamente), una desorganización de la estructura, con disminución definitiva de las resistencias mecánicas y aumento de la permeabilidad. Este riesgo es tanto mayor cuanto más joven es el hormigón y cuanto mayor sea el

agua de amasado (exceso de agua libre). Se considera que, para evitar este riesgo, un hormigón correctamente ejecutado debe alcanzar una resistencia mínima a compresión de 35 kp/cm².

Asimismo, el encogimiento del hormigón con el frío (retracción térmica) aumenta los riesgos de fisuración pero, sobre todo, son las grandes diferencias de temperatura entre el núcleo y las caras de una pieza las que más aumentan este riesgo, al surgir tensiones internas importantes.

En estas circunstancias los cementos más indicados son los portland puros de alto contenido en C₃S, molidos a elevada finura. No son recomendables los cementos con adiciones, tanto menos cuanto mayor sea el contenido de las mismas, singularmente si son escoria o ceniza volante, en grandes proporciones. Además los cementos con estas dos últimas adiciones son muy sensibles a la desecación.

El cemento aluminoso, convenientemente empleado, da, en épocas de helada, resultados superiores a los mejores cementos portland.

En cuanto a *dosificaciones*, en tiempo frío es interesante emplear dosificaciones de cemento elevadas, ya que esto permite respetar una relación agua/cemento baja, sin reducir la trabajabilidad del hormigón (Tabla IX).

La experiencia demuestra que los hormigones en tiempo frío no pueden prepararse con *áridos* porosos o heladizos, procurando, además, que la forma de los mismos sea lo más redondeada posible para reducir las necesidades en el agua de amasado. Deben almacenarse protegidos con lonas o en silos, evitando la inclusión de nieve o hielo que contribuirían a enfriarlos y a disminuir la compacidad del hormigón.

TABLA VIII

Temperatura de conservación	Resistencia a compresión (Kp/cm ²)		
	1 día	2 días	7 días
18° C	40	100	225
12° C	12	50	160
10° C	10	46	150
8° C	10	45	145
6° C	6	25	135
4° C	4	22	130
0,5° C	2	15	100

TABLA IX

Dosificación (kg/m ³)	A/C	Temperatura conservación (° C)	Resistencia a compresión (Kp/cm ²)			
			1 día	2 días	3 días	7 días
250	0,96	18	20	45	60	90
		0,5	0	10	16	48
300	0,67	18	57	130	168	255
		0,5	2	24	45	150
400	0,53	18	88	197	253	340
		0,5	4	26	90	232

El *agua de amasado* debe responder a las especificaciones habituales, no contenido, especialmente, materiales susceptibles de retardar la hidratación.

Las *relaciones agua/cemento*, en tiempo frío, deben ser iguales o inferiores a 0,5, lo cual obliga a estudiar cuidadosamente la granulometría de los áridos, a emplear medios de vibración enérgicos o a emplear aditivos.

Pueden emplearse *aditivos*, garantizados por norma o por ensayos, de uno de los tres siguientes grupos:

- Plastificantes, que permiten reducir el agua de amasado, a igualdad de trabajabilidad.
- Aireantes, que introducen de 4 a 6 por 100 de aire en forma de burbujas, evitando el efecto capilar y absorbiendo el aumento de volumen debido a la eventual congelación del agua.
- Aceleradores de fraguado y endurecimiento, que permiten luchar contra el efecto retardador del frío (deben evitarse los productos que contienen cloruro cálcico para no crear problemas de corrosión de armaduras).

En caso de helada se hace necesario *calentar los componentes del hormigón*, regulando su temperatura de forma que la resultante en el hormigón después del amasado esté comprendida entre + 10 y + 30° C. Conviene colocar el hormigón a la temperatura más baja posible (siempre que no se hiele y pueda curarse convenientemente), ya que así se consiguen mejores resistencias finales, mayor durabilidad y menor exposición a la fisuración por choque térmico; es, pues, preferible acercarse más a + 10° C que a + 30° C.

El cemento no debe introducirse en la hormigonera muy caliente, ni ponerse directamente en contacto con el agua a más de 60° C para evitar fraguado rápido.

La fórmula siguiente permite calcular la temperatura final del hormigón, en función de la de sus componentes:

$$T = \frac{0,2 CX + EY + 0,2 AZ}{0,2 C + E + 0,2 A}$$

donde:

- X: Temperatura inicial de cemento en °C;
C = peso del cemento en kilos.
- Y: Temperatura inicial del agua en °C;
E = peso del agua en kilos.
- Z: Temperatura inicial de los áridos en °C;
A = peso de los áridos en kilos.
- T: Temperatura final del hormigón en °C.

En la práctica, se gana aproximadamente 1 °C en la temperatura del hormigón amasado elevando:

- Bien 10° C la temperatura del cemento.
- Bien 5° C la temperatura del agua.
- Bien 1,5° C la temperatura de los áridos.

Calentar el agua conduce, en general, a la solución más económica; pueden ganarse hasta 15° C en la temperatura del hormigón.

Si se calientan los áridos se hará, preferentemente, en seco (por ejemplo, tuberías con vapor o agua caliente). Si se calientan directamente con chorro de vapor, se mojan los áridos y deben hacerse las oportunas correcciones en la dosificación de agua; se corre el peligro de formación de hielo posteriormente, si no se utilizan de inmediato.

Una vez preparado el hormigón deben mantenerse una serie de precauciones durante su transporte, puesta en obra y endurecimiento, tendentes a:

- Limitar al máximo la caída de temperaturas.
- Estar adecuadamente preparados encofrado, armaduras y hormigón ya colocado para recibir nuevas amasadas.
- Frenar las pérdidas de calor en el hormigón en las primeras edades, hasta que adquiera suficiente resistencia para impedir los daños de la posible helada.

4.2. Hormigonado en tiempo caluroso (25)

Como tiempo caluroso se define, cualquier combinación de temperaturas de aire elevadas, baja humedad relativa y velocidad del viento tales, que tienden a dañar la calidad del hormigón fresco o endurecido.

Los desórdenes que puede provocar en el hormigón el tiempo caluroso son más comple-

jos y menos conocidos que los producidos por el frío, aunque los nefastos efectos pueden prevenirse con un estudio adecuado del hormigón.

Los efectos del calor sobre el comportamiento del hormigón se centran en las siguientes características:

- Se acelera el fraguado y endurecimiento del conglomerante (esta propiedad se aprovecha precisamente en la prefabricación). Por encima de 40° C, el fraguado, en ciertos casos, puede comenzar ya a los 10 minutos después del amasado.
- Se puede provocar la evaporación rápida de agua de amasado, apareciendo una fuerte retracción antes del final del fraguado (retracción plástica) con peligro, a veces, de privar al conglomerante de una parte del agua necesaria para su hidratación y, por supuesto, de producir una fisuración más o menos importante.
- El calor puede ser causa de una «retracción térmica» importante, consecuencia del enfriamiento ulterior de los hormigones: Tensiones de tracción provocadas por contracción diferencial, consecuencia de la mala conductividad térmica del hormigón.

En los cementos, la hidratación es siempre un fenómeno exotérmico. La cantidad de calor desprendido y su velocidad en el desarrollo es variable según el tipo, clase y categoría. Aparte de los cementos aluminosos (fuertemente exotérmicos), este calor es importante para los cementos portland puros molidos finos (P-550 y P-450 de alta resistencia inicial).

Muy útil en tiempo frío, esta propiedad es perniciosa en climas cálidos, particularmente en la ejecución de grandes masas.

Es, por tanto, interesante utilizar, en la medida de lo posible, *cementos* de débil calor de hidratación: Cementos con adiciones, de bajo tipo resistente. No obstante, debe señalarse que los hormigones hechos, por ejemplo, con cementos siderúrgicos con alta proporción de escoria (S-III según RC-75) son muy sensibles a la desecación; exigen, por tanto, medidas de protección más eficaces.

Finalmente, la *dosificación* de cemento deberá ser lo más reducida posible, compatible con

la granulometría de árido elegida y las resistencias deseadas. Toda sobredosificación conducirá siempre a un aumento del calor de hidratación y de la retracción hidráulica.

En cuanto a *áridos*, se deben emplear, preferentemente áridos calizos en vez de silíceos ya que su coeficiente de dilatación es más pequeño y, por lo tanto, provocan menor retracción térmica.

Como los hormigones son tanto más sensibles a la desecación cuando son menos compactos y más porosos, convendrá buscar el hormigón de máxima compacidad, compatible con los medios de puesta en obra, que pueda llevarse a cabo con los áridos disponibles en obra, empleando áridos correctores si fuera necesario.

En cuanto al *agua de amasado* debe reducirse al mínimo admisible, ya que la evaporación del agua en exceso provoca la formación de poros «abiertos», que afecta negativamente a las resistencias mecánicas, aumenta la retracción y favorece la desecación.

Los *aditivos* plastificantes permiten cumplir esta función sin menoscabo de la trabajabilidad. También son interesantes los retardadores de fraguado solos o combinados con el efecto plastificante.

En tiempo caluroso, al proceder al amasado, debe procurarse el *enfriamiento* de todos los constituyentes del hormigón. Todas las precauciones en este sentido son útiles: emplear agua fría, rociado periódico con agua de los áridos, conservación de estos al abrigo del sol, etc. En casos extremos (construcción de presas, por ejemplo), puede ser necesario emplear hielo triturado en vez de agua ó enfriar el hormigón in situ con tuberías sumergidas por las que circula una salmuera de baja temperatura.

Teniendo en cuenta el calor específico de los constituyentes del hormigón y su participación en peso, la repercusión proporcional de las temperaturas de los componentes sobre la temperatura final del hormigón es del siguiente orden: 1 para el cemento, 3 para el agua y 6 para los áridos.

Por otro lado, todos los materiales absorbentes deben ser puestos a saturación antes de la confección y puesta en obra del hormigón, para evitar una desecación prematura por ab-

sorción. Esto es particularmente importante en hormigones preparados con árido ligero.

Finalmente, una vez colocado el hormigón, puede surgir una evaporación rápida del agua de amasado provocada por vientos cálidos, baja humedad relativa, calor solar, etc. Para evitar esto en los primeros días se emplean varios métodos: Rociado de la superficie con agua, láminas de plástico, sacos o arena mojados, o productos de curado como se emplean, frecuentemente, en la construcción de firmes de carreteras.

5. IMPORTANCIA DE LA REOLOGIA DEL HORMIGON PARA FACILITAR EL TRANSPORTE Y COLOCACION EN OBRA

Desde antiguo han sido muy laboriosos los pasos seguidos por el hormigón desde la hormigonera hasta su correcta colocación en el encofrado; unas veces, por tener que transportar en obra cantidades discretas de hormigón en condiciones y con medios poco productivos; otras, por tener que manejar o colocar hormigones poco dóciles con técnicas incómodas y, en ocasiones, por tener que hormigonar zonas o realizar construcciones especiales que resulta complejo con las técnicas tradicionales.

La evolución en la ciencia y tecnología de los materiales ha permitido resolver estos problemas, al adquirir un conocimiento más profundo de la reología del hormigón, con la participación prioritaria del cuarto componente del hormigón: los *aditivos*. A ello se dedicarán los próximos capítulos.

5.1 Hormigón para bombear

Para preparar un hormigón que sea bombeable, se precisa conocer el comportamiento de una suspensión que se mueve en una tubería impulsada por presión.

Dicho comportamiento crea la tendencia a producir una segregación de los finos hacia la periferia, con lo que se distinguen dos partes bien diferenciadas, en el hormigón que discu-

re por una tubería:

- Un bloque central que se mueve sin deformaciones (sin segregación).
- Una capa delgada exterior, rica en finos.

Por esta circunstancia, el hormigón para bombeo debe ser coherente, por un lado, y suficientemente rico en finos como para formar la película periférica, por otro.

La cohesividad exigida será tanto mayor cuanto mayor sea la presión de bombeo requerida, ya que siempre hay un gradiente de presiones tal que, sobrepasado, se produce la rotura de la mezcla.

En cuanto al porcentaje de *finos* tiene sus límites, porque un exceso de la lechada segregada en la pared de la tubería tiene una alta resistencia a la deformación y, por tanto, crece mucho la resistencia al deslizamiento.

El óptimo de finos se relaciona (26) con el volumen de huecos, resultando que, cuando el contenido de finos (cemento y árido fino) es igual o mayor que el contenido de huecos, las mezclas son bombeables, salvo cuando la cantidad de cemento es excesiva. Con pocos finos se produce segregación, con el consiguiente atasco (Tabla X).

La razón de que todos los huecos estén llenos de finos es que es la única forma de que se transmita la presión a los áridos gruesos. El que sea ligeramente mayor la proporción de finos que los huecos es porque se precisa una pequeña cantidad para formar la película lubricante de la tubería, y otra, para recubrir los ári-

TABLA X

F/H	17 %	20 %	25 %	28 %
30 %	B D	B	B	N B'
25 %	B	B	B	NB'
20 %	B	B	NB'	NB
15 %	B	BO	NB'	NB

Donde:

H: Volumen de huecos.

F: Volumen de finos.

B: Bombeado.

BD: Bombeado con dificultad.

BO: Bombeado pero se destruyó.

NB: No bombeado.

NB': Mezclas bombeables al añadir éteres de celulosa.

dos gruesos para que no haya contacto entre ellos (27).

Como es de prever, los *áridos* de machaqueo son difíciles de bombear, acusándose la dificultad cuando existen lajas y cantos vivos, llegando al encajamiento del árido.

En principio, es obvio que el tamaño máximo del árido viene limitado por el de la tubería, dando la bibliografía valores desde 1/2,5 a 1/5 de dicho diámetro (27, 28). El ACI recomienda los siguientes valores:

TABLA XI

Diámetro interior (mm)	100	125	150	200
Tamaño máximo (mm)				
— Mezcla rica	38	50	50	75
— Mezcla pobre	25	38	38	75
Relación de tamaños:				
— Mezcla rica	2,67	2,5	3	2,67
— Mezcla pobre	4	3,33	4	2,67

En cualquier caso, se recomienda un límite en el tamaño máximo ($<$ de 15 por 100 sobre 30 mm, sin pasar de 70 mm).

En cuanto a *granulometría*, los áridos deben tener el mínimo de finos compatible con el bombeo, pero como los huecos deben de estar rellenos de finos, dichos huecos deben ser mínimos. Como para ello, la superficie total debe ser reducida, es obligado disponer de tamaños de áridos grandes. El módulo de finura de las arenas suele encontrarse entre 2,6 y 2,8 (29).

A mayor finura de arena, mayor cantidad de grava. Sin embargo, cuanto menor es el tamaño de esta, menor debe ser su cantidad. Hormigones con un volumen de árido grueso del 50 al 60 por 100 se bombean bien.

En cuanto a la *forma del árido*, si la grava es de machaqueo, conviene emplear arenas redondeadas y, en el caso extremo de que todo sea de machaqueo, se recomienda adicionar arenas naturales para facilitar el bombeo.

Si se trata de hormigones con árido ligero, surgen las dificultades propias de su porosidad y consecuente absorción de agua de estos áridos. Deben saturarse previamente al máximo, representando cada uno de ellos un caso particular que conviene analizar por separado.

Sobre los *cementos* habrá que considerar su naturaleza y su finura. Interesa, fundamentalmente, que el fraguado no sea rápido y que la curva granulométrica, unida a su naturaleza, sea la idónea para dar plasticidad a la pasta y suficiente capacidad de retención de agua para facilitar su bombeo.

De tipos de cemento quizás los menos indicados sean los Portland ARI, por su excesiva finura. Del resto, son preferidos los PUZ-I y, sobre todo los PUZ-II (por el poder plastificante de la ceniza volante), y sus correspondientes PA, en menor medida.

En cuanto a la *cantidad de cemento*, dependerá del contenido de finos de las arenas, para cumplir la misión principal citada para el bombeo; normalmente, se recomienda que, al menos, el 80 por 100 de los finos sea proporcionado por el cemento, cuya dosificación, a su vez, no suele ser inferior a 300 kg/m³ de hormigón.

En cuanto a la *relación A/C*, se considera crítica la zona de 0,4 a 0,6 con consistencias de 5 a 7,5 cm, en el cono de Abrams, obteniéndose un hormigón plástico y coherente. Mezclas más secas dificultan el bombeo y más fluidas son propensas a sangrar y segregarse, con posible obstrucción de la tubería.

Existen *aditivos* especiales para el bombeo (derivados de celulosa, por ejemplo) que, además de ser plastificantes, mejoran la cohesión por aumentar la viscosidad de la fase acuosa.

El amasado de los hormigones para bombeo suele ser más prolongado de lo normal, empleándose, a veces, técnicas enérgicas para garantizar una homogeneización perfecta. El transporte, si lo hay, debe ser breve, para que se conserve al máximo el comportamiento reológico inicial.

Como resumen, el hormigón bombeado exige unas condiciones óptimas de granulometría, consistencia y dosificación, asequibles y controlables con los medios usuales en las centrales de hormigón.

5.2 Hormigón fluido (30)

El hormigón muy blando se emplea desde siempre pero, también siempre, se conocieron

sus inconvenientes por el exceso de agua empleado en su preparación. La tendencia ha sido ir hacia hormigones lo más secos posible, por sus mejores cualidades, pero ello ha obligado a desarrollar costosas máquinas de compactación que resultaban ruidosas, provocando cuantiosas molestias.

Ante estos problemas, la idea de volver al «hormigón líquido» seguía latente.

Los desarrollos en la química de las macromoléculas han hecho posible crear productos sintéticos con propiedades definidas. El primer resultado de este desarrollo, un producto de condensación melamina-fomaldehído, fue decisivo para la introducción definitiva del hormigón «líquido» o «fluido». Hoy día, estos y otros aditivos, empleados para la fabricación del hormigón fluido, se conocen bajo el nombre genérico de *fluidificantes* o *superplastificantes*.

El hormigón fluido se prepara a partir de un hormigón plástico (asiento en el cono Abrams 5-9 cm), al que se añade un fluidificante o superplastificante (cono Abrams de 20 a 25 cm).

Si la consistencia inicial del hormigón es muy seca (cono < 5 cm) se requiere mayor proporción de aditivo para conseguir un escurrimiento adecuado. Si es blanda (> 9 cm), aparecen segregaciones que se conservan en el hormigón fluido.

La dosificación óptima del *fluidificante* es de 1,2 a 1,8 por 100, referido al peso del cemen-

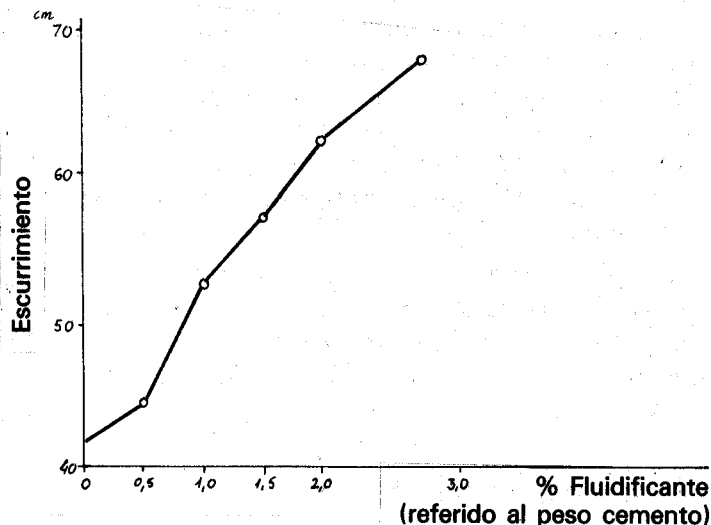


Figura 4.—Influencia del fluidificante en la consistencia del hormigón con una relación constante de agua/cemento.

to. Un exceso propende a la segregación de la mezcla (Figura 4).

La *granulometría de los áridos* es muy importante, debiendo cumplir lo siguiente:

- El contenido de finos del hormigón (cemento + arena de 0 a 0,25 mm) debe ser de 400 kg/m³ para hormigón con tamaño máximo de árido de 32 mm y de 450 kg/m³ para un hormigón con tamaño máximo de árido de 16 mm.
- La proporción de arena de 0 a 1 mm debe ser, al menos, de 18 por 100 (óptimo alrededor de 25 por 100) en peso, referido al total del árido. Para contenidos de cemento de 270 kg/m³ o menores se aconsejan cantidades superiores, llegando a proporciones de 35 por 100 en casos especiales.

Como el efecto de los plastificantes, en general, es limitado en el tiempo (Figura 5) (después de media a una hora, el efecto se reduce y se vuelve a la consistencia inicial), el hormigón fluido se preparará inmediatamente antes de su puesta en obra, debiendo ejecutarse esta rápidamente para aprovechar al máximo sus buenas características (31).

Por eso, si se trata de hormigón premezclado, puede ser necesario incorporar el fluidificante a pie de obra.

La descarga y puesta en obra del hormigón fluido es rápida y económica, siendo mínima la compactación necesaria. El bombeo es un sistema cómodo y eficaz para este hormigón.

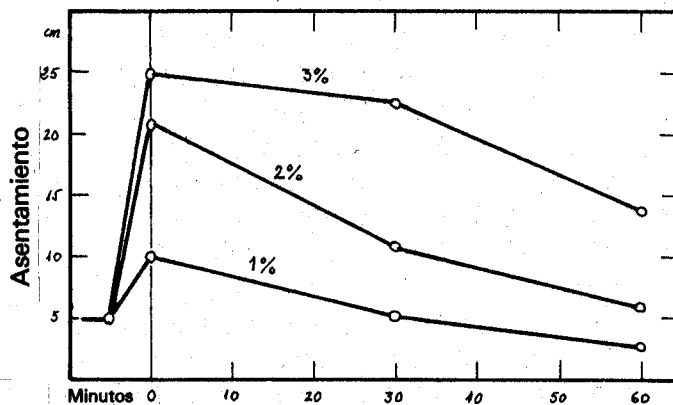


Figura 5.—Efecto de la adición de 1 a 3 por 100 de fluidificante y disminución de la fluidez en función del tiempo (s. Malhotra).

Por sus buenas y variadas propiedades (mayor densidad, mejor resistencia, baja tendencia a la fisuración, no oclusión de aire y ser coherente sin segregación), estos hormigones son prácticamente adecuados para toda clase de construcciones, salvo que se trate de superficies inclinadas (pendiente $> 2-3$ por 100).

Dan excelentes resultados en trabajos de hormigonado difíciles (piezas muy delgadas —losas—, o fuertemente armadas) en que no es posible el cerrado correcto del hormigón por vibrado.

Economizan la puesta en obra, ya que los trabajos de compactación se reducen considerablemente por su gran docilidad y fluidez. Las superficies acabadas son más uniformes, lo que les hace adecuados para hormigones vistos, al quedar bien marcados los cantos y bordes de las piezas estructurales.

En resumen, el hormigón fluido muestra, una vez más, que el material hormigón es susceptible de nuevas aplicaciones, ofreciendo soluciones simples y, a la vez, económicas.

5.3 Hormigón proyectado (32)

El hormigón proyectado o gunitado se define como una mezcla de cemento, agua y áridos proyectados a alta velocidad in situ, para producir una masa densa y homogénea.

Inicialmente, esta técnica se empleó para la reparación de estructuras dañadas y deterioradas pero, hoy día, se emplea cada vez más como técnica de nueva construcción. Es particularmente adecuada para construcciones de poco espesor, formas complejas y zonas de trabajo de difícil acceso (revestimiento de túneles, cubiertas laminares, capas de aislamiento con mallazo intermedio, hormigones con fibras, etc.)

El tamaño máximo del *árido* oscila desde 40 mm, a menos de 5 mm, siendo el más frecuente de 5 a 10 mm. Las *relaciones árido/cemento* oscilan de 1 a 10, siendo las más frecuentes de 3 a 4.

La *relación A/C* en la mezcla de entrada es muy alta, oscilando de 3:1 a 4:1.

Siempre hay interés en el uso de *aditivos* ace-

leradores, particularmente para aplicaciones subterráneas, para acelerar la velocidad de colocación y para proporcionar resistencia temprana para el soporte inmediato de la roca.

El uso de *fibras* en este tipo de hormigón es de interés general —acero, vidrio, nylon, con predominio de las primeras— para mejorar la resistencia a flexión y la tenacidad (33).

Como resumen, el hormigón gunitado difiere del hormigón colocado normalmente, en varios aspectos: es más rico en cemento, tiene un tamaño máximo de *árido* menor y diferente granulometría y se somete a un proceso que puede producir un material muy variable y anisótropo.

6. RESUMEN Y CONCLUSION

Por el carácter un tanto general del tema propuesto y las limitaciones en su extensión, en este trabajo se han desarrollado someramente los aspectos más destacados que inciden directamente en la adecuada elección de los hormigones, según las necesidades de los distintos tipos de obra.

En una primera parte se han tratado los componentes del hormigón, con una mayor extensión en los cementos por ser el componente más decisivo, en general, en el comportamiento posterior del producto acabado.

En un segundo capítulo se hace un breve estudio de los hormigones adecuados a los cuatro modelos de obra más significativos y de mayor volumen en la práctica: hormigón estructural normal, hormigón en grandes masas, hormigón de alta resistencia y hormigón en ambientes agresivos.

Más adelante se describen las peculiaridades de los hormigones para aplicaciones más específicas, centrándose la exposición en los hormigones ligeros, pesados, refractarios y armados con fibras.

Finalmente, se dedican dos capítulos a otros dos aspectos que inciden directamente en la adecuación de los hormigones en la obra: las condiciones climáticas y las propiedades reológicas del material.

BIBLIOGRAFIA

1. CHARRETON, C.: «Perspectivas sobre el desarrollo del hormigón hacia el año 1990». Cemento-Hormigón, n.º 560, julio, 1980.
2. CALLEJA, J.: «Empleo racional de los cementos para los diferentes tipos de obra». Materiales de Construcción, n.º 180, octubre-noviembre-diciembre, 1980.
3. Materials for concrete». Building Research Establishment. Digest n.º 237, mayo, 1980.
4. SHACKLOCK, W. H.: «Concrete constituents and mix proportions». Cement and Concrete Association, 1974.
5. «Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado (EH-82)». Comisión Permanente del Hormigón. Servicio de Publicaciones del MOPU. Madrid, 1982.
6. «Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón Pretensado (EP-80)». Comisión Permanente del Hormigón. Servicio de Publicaciones del MOPU. Madrid, 1980.
7. «Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos (RC-75)». Comisión Permanente del Cemento. Servicio de Publicaciones del MOPU. Madrid, 1975.
8. VENUAT, M.: «Adjuvants et traitements des mortiers et betons». París, 1971.
9. RIXOM, M. R.: «Aditivos para los hormigones». Editores Técnicos Asociados. Barcelona, 1984.
10. «Admixtures for concrete. Guide for use of admixtures in concrete». ACI Manual of Concrete, Parte 2, 1983, ACI-212 IR y 2R.
11. ARREDONDO, F.: «Dosificación de Hormigones». Manuales y Normas del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid, 1977.
12. DREUX, G.: «Nouveau guide du béton». Eyrolles. París, 1976.
13. «Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete». ACI Manual of Concrete, Parte 1, 1983, ACI 211.1.
14. CALLEJA, J.: «Código de buena práctica para la utilización de los cementos del Pliego RC-75». Manuales y Normas del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid, 1977.
15. RONALD, L. BLICK y otros: «Proportioning concrete mixes». ACI Publication AP-46, 1974.
16. POWERS, T. C. y otros: «Permeability of portland cement paste». Proc. J.A.C.I., n.º 3, noviembre, 1954.
17. «Concrete in sulphate-bearing soils and groundwaters». Building Research Establishment. Digest n.º 250, junio, 1981.
18. «Guide for Structural lightweight aggregate concrete». ACI Manual of Concrete, Parte 1, 1983, ACI 213R.
19. «Resistance des bétons aux hautes températures». Bulletin du Ciment, n.º 23, noviembre, 1979.
20. SWAMY, R. N.: «La tecnología del concreto reforzado con fibras cortas para aplicaciones prácticas». Revista IMCYC, n.º 71, noviembre-diciembre, 1974.
21. RAMACHANDRAN, V. S; FELDMAN R. F. y BEAUDOIN J. J.: «Fibre reinforced cement systems». Heyden. Londres, 1981.
22. EGINGTON, J; HANNANT D. J; y WILLIAMS R. T.: «Steel fibre reinforced concrete». Precast Concrete, julio y agosto, 1975.
23. «Cold weather concreting». ACI Manual of Concrete, parte 2, 1983, ACI-306R.
24. BROUARD, J. M.: «Bétonnage par temps froid, réalisations pratiques». Annales I.T.B.T.P., enero, 1967.
25. «Hot weather concreting». ACI Manual of Concrete, parte 2, 1983, ACI-305R.
26. ANEFHOP: «El bombeo del hormigón». Anefhop, Madrid, 1974.
27. ANDERSON, W. G.: «Análisis de mezclas de concreto para determinar su bombeabilidad». Revista I.M.C.Y.C, n.º 92, mayo-junio, 1978.
28. «Placing concrete by pumping methods». ACI Manual of Concrete, parte 2, 1983, ACI-304.2R.
29. HERRERO, E. y otros: «Bombeo. Maquinaria: Sus aspectos, dosificaciones adecuadas». Cemento-Hormigón, junio, 1977.
30. AIGNESBERG, A. y TAMBOUR, A.: «Hormigón fluido. Preparación y aplicación». Cemento-Hormigón, n.º 532, abril, 1978.
31. «Le béton liquide». Bulletin du Ciment, número 6, junio 1978.
32. HILLS, D. L.: «A review of sprayed concrete». Concrete, n.º 2, 3 y 4, febrero, marzo, y abril, 1980.
33. «State of the Report on fiber reinforced concrete». ACI Manual of Concrete, parte 5, 1983, ACI-544.1R.