

Consideraciones generales sobre los hormigones de cemento portland y base para su proyecto

Prof. M. SABESINSKY FELPERIN*

Estos hormigones, tal y como indica el título de este artículo, están constituidos a base de cemento portland y, además, por: agregados pétreos naturales, agua de amasado y a veces una pequeña cantidad de aditivos minerales y/o químicos para conferirles propiedades especiales, ya sea en estado fresco o en estado endurecido.

Los agregados ocupan entre el 65 y el 85 %, aproximadamente, del volumen sólido del hormigón y su función es la de:

- a) suministrar un material económico de relleno;
- b) reducir y localizar la retracción;
- c) mejorar la resistencia al desgaste.

Los mismos poseen a menudo reactividad con los productos de hidratación del cemento portland, desarrollando compuestos capaces de deteriorar al hormigón de cemento portland en distintos grados.

El hormigón a elaborar debe ser adecuado a cada propósito en particular, al objeto de lograr las cualidades requeridas de:

- a) resistencia mecánica;
- b) durabilidad;
- c) facilidad de moldeo, sin segregación de componentes;
- d) economía.

El hormigón deberá ser apto para resistir mecánicamente a los esfuerzos para los cuales ha sido proyectado y ser altamente durable en el tiempo, sin perder ninguna de sus propiedades características. La durabilidad se refiere no sólo al hormigón de cemento portland, sino también al material de refuerzo (la armadura de acero).

El proyecto de este hormigón de cemento portland debe considerar:

- a) las características de los materiales componentes;
- b) los requisitos de la estructura a conformar;
- c) las condiciones del medio ambiente a que se verá expuesta la misma;
- d) otras propiedades deseables del hormigón.

* Profesor titular (Investigador). Jefe del Laboratorio de Tecnología de Materiales de Construcción y Hormigón, en el Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE). Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería. (Universidad Nacional de Rosario-Argentina).

Después de haber llegado al propio endurecimiento, el hormigón ofrece excelente resistencia a la compresión y al desgaste, puede ser durable y relativamente impermeable al agua.

Como desventaja, el hormigón endurecido presenta baja resistencia a la tracción, retracción por secado, expansión por hidratación diferida o reacciones internas, cambios de volumen por efecto térmico o higrotérmico y alta permeabilidad, si no ha sido proyectado convenientemente.

Las resistencias a la compresión y a la tracción del hormigón son más bajas que las correspondientes a la pasta endurecida de cemento portland y a la de los agregados. Estos hechos indican que la rotura del hormigón tiene lugar generalmente en la interfase entre los agregados y la pasta conglomerante.

COMPONENTES

En relación al cemento portland y al agua de amasado se ha concluido, en base a las investigaciones llevadas a cabo en trabajos previos, que ambos deben ser considerados en forma conjunta, en lugar de estimar al primero como a un elemento granular más en el conjunto de componentes del hormigón a elaborar.

En consecuencia, considerando a la pasta de cemento por una parte y a los agregados gruesos y finos por la otra se puede estimar al hormigón como a un hormigón de cemento portland integrado por un esqueleto granular (el agregado compuesto) y una pasta conglomerante (la pasta de cemento).

En el caso de empleo de aditivos incorporadores intencionales de aire, las micro-burbujas presentes compensan las deficiencias en la granulometría del agregado fino y actúan como tal. Este sistema de micro-burbujas incoalescentes se considera parte componente del esqueleto granular.

La viscosidad de la pasta conglomerante resulta ser función de su relación *agua/cemento* (*a/c*). En esta relación se tiene el factor de mayor influencia en las propiedades mecánicas y fisicoquímicas del hormigón de cemento portland obtenido. Si la consolidación del hormigón fresco se detiene en el preciso momento en que la pasta de cemento aparece en la superficie, al no quedar huecos sin llenar, la resistencia mecánica será función principalmente de la relación *a/c*.

LA PASTA CONGLOMERANTE

Una reducción de la relación *a/c* se traduce en un aumento de la resistencia mecánica y de la durabilidad de la pasta de cemento hidratada y en una disminución de su red capilar o sistema de poros, generalmente intercomunicados. Esta porosidad dentro de la estructura de la pasta de cemento es consecuencia del agua que no se combina químicamente con los componentes del cemento portland.

Se puede expresar que la correspondencia entre los valores de la relación *a/c* y la resistencia mecánica a la compresión equivale a la relación entre esta resistencia y la porosidad de la pasta hidratada, a la edad del ensayo y en las condiciones higrotérmicas de conservación dadas.

De acuerdo al estado en que se encuentran los agregados que componen el esqueleto granular, pueden considerarse básicamente en el hormigón fresco dos relaciones a/c :

- 1) relación *agua de amasado/cemento*, cuando los componentes del esqueleto granular se encuentran en estado seco;
- 2) relación *agua efectiva/cemento*, cuando los componentes del esqueleto granular se encuentran en estado de saturados y superficie seca.

La diferencia entre ambas relaciones, para el caso de los hormigones de cemento portland preparados con esqueletos granulares compactos de la misma naturaleza mineralógica, se acentúa a medida que aumenta el tamaño máximo nominal del agregado grueso componente. Este resulta ser prácticamente igual al tamaño máximo del esqueleto granular que compone.

Dado que resulta ser más simple determinar el agua total retenida por los agregados (agua absorbida y agua adsorbida) que el agua correspondiente al estado de saturado y superficie seca de las partículas, es más correcto proyectar hormigones con agregados gruesos y finos en estado seco, ajustando luego los pesos resultantes por contenidos de humedad, en estado natural.

POROSIDAD-SISTEMA DE POROS

La cantidad necesaria de agua para la hidratación completa del cemento portland es del orden del 20 % respecto del peso de éste. Al objeto de lograr una pasta conglomerante plástica, se emplea una cantidad de agua de amasado mayor.

La menor relación a/c empleada, por razones de orden práctico, es de 0,35. En consecuencia, el mínimo exceso de agua de amasado es de aproximadamente el 15 % del peso del cemento.

El agua que no se combina químicamente con los componentes del cemento portland como ya se ha expresado, origina poros, es decir, capilares dentro de la estructura de la pasta. La parte sólida de la pasta completamente hidratada, material que engloba a los poros está formada por el gel del cemento (de dimensiones coloidales) y grandes cristales embebidos en el gel. El principal constituyente del gel del cemento es el silicato de calcio hidratado, denominado gel de tobermorita. La porosidad inicial es mayor en el momento del amasado y se va reduciendo a medida que la hidratación del cemento portland se va completando, dependiendo en consecuencia de la cantidad de agua inicialmente mezclada con el cemento. El agua de hidratación afecta en consecuencia el espacio de los poros, al ocupar los productos de hidratación más volumen que el cemento anhidro.

El sistema de poros de la pasta hidratada comprende a:

Pequeños poros

Constituyen los espacios entre las partículas del gel del cemento. El principal componente de este gel es, como ya se ha señalado, el silicato de calcio hidratado (gel de tobermorita). Las partículas pueden llegar a tener una dimensión promedio de aproximadamente una milésima del tamaño medio de los granos del cemento.

Grandes poros

Constituyen los espacios entre agregaciones de las partículas del gel del cemento. Estos macroporos siguen siendo aún pequeños para ser visibles con la ayuda de un microscopio óptico.

La porosidad total de la pasta completamente hidratada, es función primordial de la relación *agua de amasado/cemento*. Varía desde el 25 % para la relación 0,35 hasta aproximadamente el 50 % para la relación 0,70.

Los poros de la pasta endurecida contienen agua y aire. A medida que la humedad ambiente se hace mayor, el agua penetra en el sistema de poros, sucediendo todo lo contrario cuando decrece la misma. El diámetro de estos poros también resulta ser función de la inicial relación *agua de amasado/cemento* y se hace mayor a medida que crece esta relación. El diámetro medio de los poros (radio hidráulico) corresponde a la relación entre el volumen de estos poros y el área total de las paredes de los mismos.

Los poros pueden llegar a intercomunicarse por las vías capilares en el mortero, formadas por la migración del agua por el proceso de exudación, y por las propias vías en la pasta generadas por el mismo fenómeno. Estas vías de intercomunicación pueden facilitar posteriormente en el hormigón de cemento portland endurecido, el ingreso y circulación de las aguas agresivas externas en contacto con el hormigón. La naturaleza de la interconexión de los poros juega un papel importante en los problemas de permeabilidad al agua y durante los ciclos de congelación y deshielo.

Se puede afirmar que:

- a) la relación a/c de la pasta conglomerante determina los valores de la porosidad total de la misma y el radio hidráulico de esta porosidad;
- b) la correspondencia entre la relación a/c y la resistencia a la compresión equivale a la relación entre esta resistencia y la porosidad total de la pasta conglomerante;
- c) a medida que el volumen ocupado por los productos de la hidratación del cemento aumenta a expensas del espacio ocupado por los poros, la resistencia mecánica de la pasta se incrementa.

Sintetizando, puede expresarse que la resistencia mecánica de la pasta hidratada de cemento portland resulta ser función de:

- a) la superficie del gel del cemento formado;
- b) la porosidad de la pasta hidratada;
- c) el tamaño de estos poros.

CAMBIOS DE VOLUMEN

El sistema de poros de la pasta endurecida de cemento portland puede estar parcialmente o totalmente lleno de agua, dependiendo su estado de la humedad ambiente. Cuando ésta decrece, el agua libre abandona a la pasta endurecida, provocando la contracción de la misma. Por el contrario, cuando la humedad aumenta, tiene lugar un proceso inverso al anterior, o sea, el agua penetra en el sistema intercomunicador de poros de la pasta, y ésta se entumece.

Los cambios de volumen se hallan influenciados por otros muchos factores, muy diferentes entre sí. La lenta hidratación de algunos de los componentes del cemento portland puede producir también cambios de volumen en la pasta endurecida de cemento.

La reacción del CO_2 de la atmósfera con casi todos los componentes de la pasta endurecida de cemento portland puede originar retracciones por carbonatación.

Por el efecto de la congelación y deshielo, el agua retenida en los poros de la pasta hidratada puede ocasionar tensiones locales. La expansión por aumentos del volumen del agua al congelarse, con valores que pueden llegar al 10 % de la expansión, puede provocar fisuras en la pasta ya endurecida. En los pequeños poros, el agua nunca llega a congelarse. Cuanto más pequeños sean los poros, menor será la temperatura a la cual los núcleos de hielo son capaces de desarrollar en cristales. Se puede estimar que el agua intersticial jamás llega a congelarse en las pastas conglomerantes de baja relación a/c .

Los cambios de volumen del mortero de cemento portland son mucho más reducidos que los correspondientes a la pasta endurecida del mismo cemento, y los cambios de volumen del hormigón son, a su vez, menores que los del mortero.

AGREGADOS COMPONENTES

Partículas superfinas

Las partículas superfinas que acompañan al agregado fino y que pasan a través del tamiz n.º 100 (0,149 mm), al ser incorporadas en su seno por la pasta conglomerante, modifican la consistencia del hormigón de cemento portland fresco y la resistencia mecánica y durabilidad del mismo, ya endurecido. Estos finos actúan además por efecto de superficie, adsorbiendo iones oxhidrilos (OH^-) de carácter electronegativo, formados por disociación del agua de amasado. En consecuencia, hacen descender el valor del pH de la pasta conglomerante ejerciendo, en forma indirecta, su influencia en la durabilidad de los hormigones, en especial en los procesos de corrosión de las armaduras de refuerzo.

Granulometría de los agregados

Si bien el esqueleto granular óptimo puede ser proporcionado por una granulometría discontinua, los agregados componentes gruesos y finos deberán tener una granulometría bastante continua.

Efecto de superficie de las partículas

El agua retenida o de mojado complementa los valores obtenidos a través del análisis granulométrico de los agregados, ya que permite considerar la forma de las partículas y la naturaleza mineralógica de las mismas. El agua retenida o de mojado comprende el agua adsorbida.

Agua de adsorción

Actúa por efecto de superficie quedando retenida en la forma de una capa tenue adherida a la superficie de las partículas, como consecuencia de la capilaridad y tensión superficial. El agua retenida total por el esqueleto granular permite calcular el agua de amasado correspondiente a una determinada consistencia y relación a/c .

Agua de absorción

Depende de la porosidad de las partículas del agregado y necesita cierto tiempo para llegar a saturarlas.

Interpretando los valores medios experimentales obtenidos para el agua retenida (agua de mojado), para cada agregado normal examinado en relación al correspondiente módulo granulométrico se han obtenido las siguientes expresiones analíticas, al aproximar estos valores por el método de los mínimos cuadrados:

— Arena silícea (Río Paraná)	$ARs \text{ (cm}^3\text{/kg)} = 135,0 - 124,1 \cdot \log Ms$
— Piedra partida granítica	$\log ARg = 2,704 - 0,198 \cdot Mg$
— Canto rodado (Río Uruguay)	$\log ARg = 2,549 - 0,195 \cdot Mg$
— Canto rodado (Río Tercero)	$\log ARg = 2,602 - 0,218 \cdot Mg$

siendo:

AR: Agua retenida o de mojado ($\text{cm}^3\text{/kg}$).

Ms: Módulo granulométrico del agregado fino.

Mg: Módulo granulométrico del agregado grueso.

Esqueleto granular compacto

La composición del esqueleto granular compacto y la naturaleza mineralógica de los agregados gruesos y finos componentes obran de manera importante, aunque indirectamente, sobre la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón.

La curva granulométrica del esqueleto granular compacto depende de la granulometría del agregado grueso, del agregado fino y de las proporciones en que ambos se mezclan.

De los dos componentes del hormigón de cemento portland (la pasta conglomerante y el esqueleto granular compacto), tiene suma importancia el lograr que el segundo sea lo más compacto posible. En consecuencia, se deberán componer agregados de diferentes finuras con el objeto de lograr esqueletos granulares de máxima compacidad, para hormigones de masa definida con efecto pared.

Durante el moldeo del elemento estructural a conformar, el hormigón de cemento portland se consolida mal cerca de las superficies rígidas. Las partículas gruesas por el efecto pared, están limitadas en su libertad de desplazamiento al encontrarse con las caras ángulos y aristas del molde. Al ubicarse tangencialmente a los planos límites, hacen entrar en juego a los elementos finos. La estructura cavernosa del hormigón que a veces se observa sobre los paramentos y especialmente en los ángulos, es consecuencia del efecto pared.

El efecto pared ha transformado la teoría clásica de la granulometría. Esto significa que las fórmulas granulométricas deberán ser previstas en función de otras consideraciones y que en este caso, se hace necesario una mayor proporción de agregado fino. Sin embargo, es el agregado grueso el que mejora la calidad del hormigón ya que con su incremento se consigue una reducción de la superficie total de las partículas del esqueleto granular.

Interesa, en consecuencia, obtener para los hormigones de masa definida con efecto pared, un esqueleto granular compacto, de mínima superficie específica el cual, para una determinada cantidad de cemento y consistencia del hormigón de cemento portland fresco, permita reducir a un mínimo la cantidad necesaria de agua de amasado.

Interpretando los valores medios obtenidos experimentalmente de los módulos granulométricos para el esqueleto granular compacto (M_a), en correspondencia con el respectivo valor del tamaño máximo nominal del agregado grueso componente ($D_{m\acute{a}x}$ — mm), se han obtenido las expresiones analíticas que siguen, aproximando esos valores por el método de mínimos cuadrados:

— Partículas angulosas $M_a = 1,85 + 2,514 \cdot \log D_{m\acute{a}x}$.

— Partículas redondeadas $M_a = 2,28 + 2,248 \cdot \log D_{m\acute{a}x}$.

Conociendo los módulos granulométricos de los agregados componentes y el módulo granulométrico del esqueleto granular a componer, pueden calcularse los porcentajes de los mismos por la ley de las mezclas.

CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND FRESCO

La consistencia se refiere al carácter de la mezcla fresca, con respecto a su estado de fluidez. Una mezcla es plástica, cuando su consistencia se encuentra entre las secas desmenzables y las muy fluidas, y es capaz de deformarse sin segregarse.

La consistencia del hormigón de cemento portland fresco deberá ser la necesaria y suficiente como para que, con el método de compactación empleado, el hormigón se deforme plásticamente permitiendo un llenado completo de los moldes, envolviendo perfectamente a la armadura y asegurando una adherencia total entre las barras de la misma y el hormigón.

La consistencia depende de la presencia de la pasta conglomerante entre las partículas del esqueleto granular que, en la forma de película, recubre a las mismas. Los esqueletos granulares compactos dan hormigones cuya consistencia en estado fresco depende del espesor de la película de pasta envolvente de las partículas componentes. Si el esqueleto granular no es compacto y tiene gran cantidad de vacíos, parte de la pasta se pierde por ocupar estos vacíos y queda menor cantidad de pasta disponible coenvolvente de sus partículas.

De acuerdo a las experiencias llevadas a cabo en el laboratorio para hormigones de cemento portland y pastas conglomerantes de relaciones a/c : 0,35 a 0,70, se puede observar lo siguiente:

- a) la consistencia del hormigón de cemento portland plástico preparado con esqueletos granulares compactos, resulta ser función de la relación entre el agua de amasado y el agua retenida total por el esqueleto granular y distinta para cada relación *agua de amasado/cemento* y superficie específica del cemento portland;

- b) para un mismo valor de la relación *agua de amasado/agua retenida* total, la consistencia resulta ser independiente del tamaño máximo del esqueleto granular y de la naturaleza mineralógica de los agregados gruesos y finos componentes;
- c) para una determinada consistencia, si la pasta es de relación *a/c* baja, hace falta mucha pasta en relación a una pequeña cantidad de la misma pero de más alta relación *a/c*;
- d) en el caso de emplearse un aditivo plastificante, incorporador intencional de aire o no, se obtiene respecto a un hormigón normal la misma consistencia pero con menor relación *agua de amasado/agua retenida* total, para cada relación *a/c* examinada.
- e) la superficie específica y el contenido en álcalis del cemento portland influyen en la consistencia del hormigón de cemento portland fresco, para una dada relación *agua de amasado/agua retenida* total, y relación *a/c*.

El agua retenida total por el esqueleto granular (por efecto de superficie y naturaleza mineralógica) se obtiene como suma de las aguas retenidas por cada uno de los agregados componentes.

En la figura, para consistencias del hormigón de cemento portland fresco, correspondientes a asentamientos de 2,5 cm, 10 cm y 15,5 cm (ASTM-C-143), se interpretan los valores obtenidos empleando cemento portland normal, de superficie específica (BLAINE): 2.500/2.700 y 3.000/3.200 cm²/g. De los tres gráficos de la figura se puede observar lo siguiente:

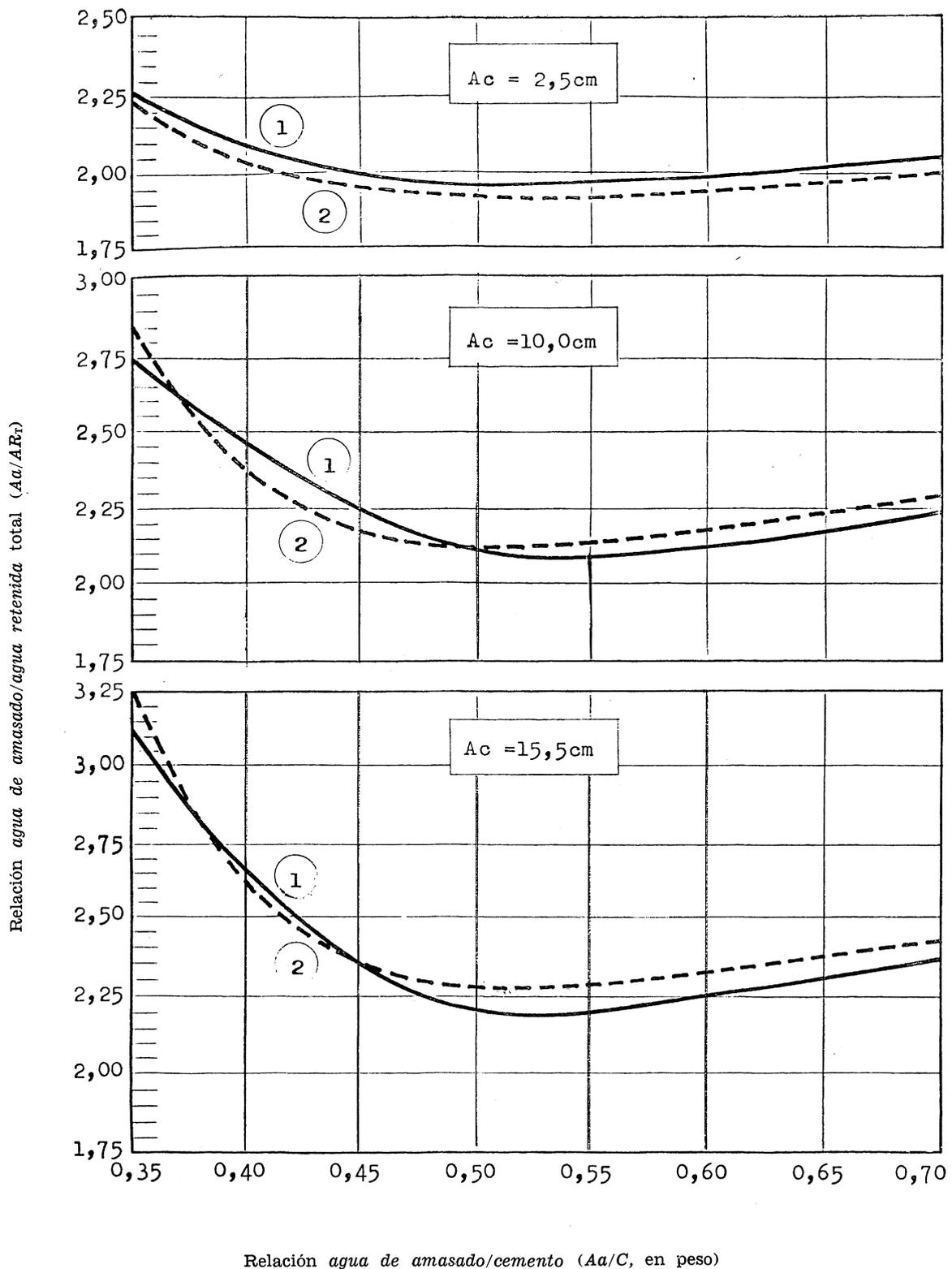
- a) para una determinada consistencia, la relación entre el agua de amasado y el agua retenida total por el esqueleto granular compacto resulta ser función de la relación *a/c* de la pasta conglomerante;
- b) en el intervalo correspondiente a las relaciones *a/c* de 0,50 a 0,55 para una determinada consistencia, la relación *agua de amasado/agua retenida* total alcanza valores mínimos;
- c) para una determinada relación *a/c* de la pasta conglomerante, el asentamiento se incrementa a medida que lo hace la relación *agua de amasado/agua retenida* total.

RESISTENCIA MECANICA

La resistencia mecánica del hormigón es una función de la relación *a/c* de la pasta conglomerante, del grado de consolidación, del tipo y calidad del cemento empleado y de la eficiencia del curado y de la edad.

El grado de adherencia entre la pasta conglomerante y las partículas componentes del esqueleto granular tiene suma importancia. Por lo general, la resistencia mecánica del hormigón resulta ser inferior a la correspondiente a la de la pasta conglomerante y a la de los agregados normales. Este hecho señala que la rotura del hormigón tiene lugar especialmente en la interfase entre los agregados y la pasta conglomerante. Por supuesto, debe tomarse también en consideración la forma de las partículas de los agregados. Las de forma acicular o de plaquetas comienzan a romperse al parecer, por flexión, antes de que la carga que soporta el elemento estructural llegue a valores que corrientemente alcanza el hormigón preparado con agregados mejor conformados.

En el caso de los hormigones preparados con aire intencionalmente incorporado, el volumen del aire se traduce en una reducción de la resistencia mecánica. El aire incorporado en la forma de micro-burbujas incoalescentes, al mejorar la trabajabilidad del hor-



Hormigón de cemento portland

Relación agua de amasado/agua de mojado o retenida total por el esqueleto granular, en función de la relación agua de amasado/cemento, para distintas consistencias del hormigón de cemento portland fresco (Ac -cm s/ASTM-C-143).

Cemento portland normal, de superficie específica (BLAINE).

⊙ : 2.500-2.700 cm^2/g .

⊙ : 3.000-3.200 cm^2/g .

migón de cemento portland fresco, permite una reducción en las cantidades originales de agregado fino y de agua de amasado. Manteniendo constante la cantidad de cemento portland, se puede contrarrestar en parte el efecto negativo de este sistema de microburbujas sobre la resistencia mecánica del hormigón endurecido.

CURADO DEL HORMIGON

El endurecimiento del hormigón es consecuencia de las reacciones de hidratación de los minerales componentes del cemento portland. Aunque estas reacciones continúan por mucho tiempo, la mayor parte de la resistencia que puede desarrollar el hormigón corresponde a la de sus primeros días de edad.

La cantidad de agua de amasado empleada en la elaboración del hormigón es, como ya se ha mencionado, superior a la que efectivamente puede reaccionar con el cemento portland. A medida que tienen lugar las reacciones de hidratación, parte del agua de amasado entra en estas reacciones, parte queda disponible para permitir su prosecución hasta la completa hidratación de la pasta de cemento, y el resto comprende al agua libre necesaria para posibilitar las mencionadas reacciones y mantener la constancia de volumen del elemento conformado de hormigón.

El proceso de curado del hormigón comprende a todas las medidas necesarias a adoptar para prevenir la evaporación de ese agua en tiempo cálido o el congelamiento en tiempo frío.

PROYECTO DE HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND

Consideraciones generales

El proyecto de un hormigón tiene por objeto determinar la combinación más conveniente de los agregados gruesos y finos a emplear, las cantidades de cemento portland, de agua de amasado y de aditivos (en caso de su empleo), al objeto de lograr un hormigón de cemento portland de adecuada trabajabilidad en estado fresco y apropiada durabilidad y resistencia mecánica en estado endurecido, de acuerdo a las condiciones de servicio a que se verá sometido el elemento estructural conformado.

Los primeros métodos actualmente superados estaban basados en la experiencia de que el espacio vacío entre las partículas del agregado grueso resulta ser igual a aproximadamente un medio de su volumen aparente. La adición de este volumen de agregado fino llenaría los vacíos del agregado grueso. Tal suposición lleva a una relación de agregado fino a agregado grueso, generalmente 1:2.

Esta suposición resulta errónea ya que los vacíos tanto en el agregado grueso como en el fino dependen de la graduación de las partículas y de la forma de las mismas.

Los métodos actuales para el proyecto de hormigones están fundados básicamente en:

- a) la relación a/c de la pasta conglomerante;
- b) la consideración de la graduación de las partículas de los agregados componentes y del agregado compuesto (esqueleto granular), la forma y características superficiales de las mismas;

- c) la relación *pasta conglomerante/esqueleto granular*;
- d) el volumen sólido del hormigón de cemento portland fresco, suma de los volúmenes sólidos de sus componentes.

En consecuencia, en todo proyecto de hormigón debe considerarse:

- a) la adecuada selección de la relación *agua efectiva/cemento*;
- b) la necesaria consistencia del hormigón fresco, de acuerdo al método de compactación a utilizar;
- c) el tamaño máximo más adecuado del agregado grueso componente del esqueleto granular compacto, a componer;
- d) la estimación del agua de amasado necesaria para obtener la requerida consistencia del hormigón fresco, para la adoptada relación *a/c* de la pasta conglomerante.

Si el hormigón contiene aire intencionalmente incorporado, en el cálculo de las proporciones en que intervendrán los materiales componentes, esta cantidad de aire debe ser tomada en cuenta en el volumen sólido total.

Método para proyecto de hormigones

Por lo general son datos del problema a resolver: la resistencia cilíndrica media a la compresión a la edad de 28 días, la adecuada consistencia del hormigón de cemento portland en estado fresco y los agregados gruesos y finos a emplear.

Para el cálculo de los materiales necesarios para componer 1 m³ de hormigón fresco y compactado, se procede como sigue:

- a) se determinan las características físicas de los agregados, obteniendo:
 - el módulo granulométrico del agregado grueso (Mg),
 - el tamaño máximo nominal correspondiente (D_{máx.} — mm),
 - la forma de sus partículas,
 - el módulo granulométrico del agregado fino (Ms);
- b) para la resistencia cilíndrica media de rotura a la compresión a los 28 días (según las condiciones de curado), se obtiene la correspondiente relación *agua efectiva/cemento portland normal*, en peso;
- c) para esta última relación y conociendo el valor del tamaño máximo nominal del agregado grueso adoptado, se obtiene la correspondiente relación *agua de amasado/cemento*;
- d) con las expresiones analíticas obtenidas, se calcula el módulo granulométrico (Ma) del esqueleto granular compacto;
- e) para el cálculo del agua retenida por efecto de superficie y naturaleza mineralógica de los agregados componentes, gruesos y finos, se hace uso de las expresiones analíticas correspondientes;
- f) conocidos Ms, Mg y Ma, y aplicando la ley de las mezclas, se obtiene el porcentaje de agregado fino (s — %) y de agregado grueso (g — %) para componer el correspondiente esqueleto granular compacto;

- g) por tratarse de agregados de diferentes pesos sólidos, se expresará el porcentaje sobre un volumen sólido total. Para éste, se puede en consecuencia determinar los volúmenes sólidos parciales de cada agregado componente;
- h) conocidos los pesos sólidos de estos agregados en estado seco, se calculan los pesos de los mismos, su agua retenida y el agua retenida total;
- i) para consistencias estimadas en asentamientos de 2,5, 10 y 15,5 cm (según ASTM-C-143) y la adoptada relación *agua de amasado/cemento*, se obtiene de la figura el correspondiente valor de la relación *agua de amasado/agua retenida* total (Aa/AR_T), para cementos de distintas superficies específicas;
- j) el agua de amasado resulta ser igual a: $Aa = AR_T \cdot Aa/AR_T$;
- k) la suma de los volúmenes sólidos de los agregados, el cemento portland y el agua de amasado corresponde a un volumen sólido teórico que puede ser igual al volumen neto total, cuando los pesos sólidos de los agregados (en estado seco) y del cemento son correctos. Generalmente, el volumen neto correspondiente al volumen sólido teórico resulta ser inferior en un 2 % por las causas señaladas. Esto significa que debe proyectarse 1,020 m³ para obtener 1 m³ de hormigón fresco y compactado;
- l) en el caso de prepararse un pastón de prueba, puede determinarse el peso de la unidad de volumen del hormigón fresco y compactado. Conocido el peso total de los materiales componentes del pastón, puede en consecuencia calcularse el volumen neto del mismo. Reduciendo este volumen a 1 m³, puede determinarse el peso correspondiente a cada uno de los componentes, por 1 m³ de material compuesto, fresco y compactado.

CONCLUSIONES

A través del examen de los agregados (granulometría, forma y efecto de superficie de sus partículas), es posible componer el esqueleto granular o agregado compuesto de máxima compacidad.

Para hormigones de cemento portland, preparados con esqueletos granulares compactos, la consistencia en estado fresco y dentro del rango plástico, resulta ser función de la relación *agua de amasado/agua retenida* total por el esqueleto granular. Esta correspondencia es distinta para cada relación *a/c* de la pasta conglomerante y superficie específica del cemento de la misma.

La consistencia obtenida en el pastón de prueba del proyecto preliminar, puede ajustarse a los valores requeridos a través del incremento o reducción de la relación *pasta conglomerante/esqueleto granular*, manteniendo constante la inicial relación *a/c* adoptada.