

3.1 Composición del Hormigón Liviano Estructural

Básicamente son válidas para el hormigón liviano estructural las mismas reglas y experiencias que para el hormigón normal. Para el primero, además de la resistencia se exige que presente una menor densidad.

Esto hace necesario que se utilicen áridos livianos de fabricación artificial, que influyen notablemente sobre el comportamiento del hormigón al amasarlo y sobre la calidad del hormigón ya fraguado. Al mismo tiempo la fabricación del hormigón se ve afectada de un cierto factor de inseguridad adicional, que tiene su origen en posibles diferencias en la calidad de los áridos.

La resistencia del hormigón normal sólo depende, prácticamente, de la resistencia de la pasta de cemento, o del mortero, la cual está determinada por la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del cemento. Estos factores influyen de manera similar en el hormigón liviano estructural.

Pero el contenido de pasta de cemento, o de mortero, y principalmente la rigidez y la resistencia de los áridos son aquí de decisiva importancia. Puesto que, en general, son menores que las del mortero, la transmisión de fuerzas en el hormigón liviano se realiza principalmente a través del mortero, mientras que los áridos, a partir de un determinado esfuerzo, al aumentar la tensión del hormigón disminuyen su participación en la absorción de cargas.

Aparece un sistema de cargas internas básicamente distinto del correspondiente al hormigón normal.

La resistencia del hormigón no puede aumentarse a voluntad mejorando la calidad del mortero.

Además, la forma y la constitución de las superficies de los granos del árido influyen directa e indirectamente en la resistencia del hormigón. Todos estos factores de influencia adicionales dependen del tipo de árido.

Con ello se dan tres factores importantes, provenientes de la composición del hormigón, que influyen sobre sus propiedades: clase de árido, contenido de mortero y resistencia del mismo.

3.1.1 Influencia de la clase de árido

El módulo de elasticidad y la resistencia de los áridos afectan directamente a la resistencia del hormigón.

Otras propiedades, como por ejemplo la absorción del agua, hacen variar los valores característicos del mortero e influyen indirectamente así sobre la resistencia del hormigón.

3.1.1.1 Resistencia límite

En realidad sería conveniente que la resistencia del hormigón β_b fuera igual a la del mortero β_m .

Esto presume que los áridos participen de igual manera en la absorción de cargas.

El módulo de elasticidad E_k de los áridos tiene que ser como mínimo igual al módulo E_m del mortero.

Para la obtención de la rigidez mínima se parte de la deformación del mortero en el estado

de rotura. Como primera condición se obtiene $E_k \geq E_m = \frac{\beta_m}{\epsilon_{mu}} \approx \frac{\beta_m}{2.10^{-3}}$

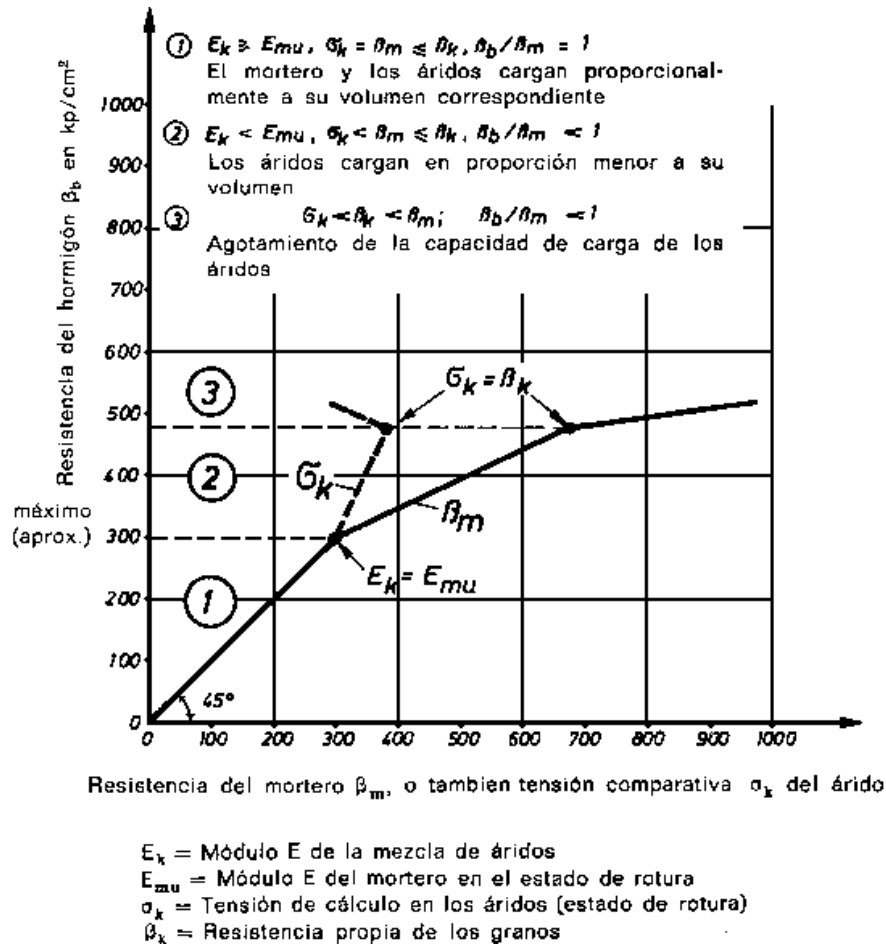


Figura 3.1-1 Relación entre la resistencia del hormigón β_b , la del mortero β_m y la tensión comparativa correspondiente σ_k en los áridos.

Además, como segunda condición, debe cumplirse que $\beta_k \geq \beta_m$

Una rigidez del árido $\beta_k > \beta_m$ no es de utilidad, puesto que la distribución de fuerzas en el árido debe realizarse siempre a través de las capas de mortero intercaladas.

Si se cumplen las dos condiciones citadas se alcanza una resistencia del hormigón, β_b igual a la del mortero β_m (**fig. 3.1-1, zona I**).

La cantidad de árido del hormigón no tiene ninguna influencia en este caso. La distribución de la resistencia es igual como en el hormigón normal. Un aumento en la resistencia del mortero significa un aumento igual en la resistencia del hormigón.

3.1.1.2 Módulo de elasticidad de los granos

Si el módulo de elasticidad E_k del árido es menor que el módulo E_m del mortero, los granos del árido se comportan como puntos débiles, aun cuando posean una elevada resistencia propia. El hormigón no alcanza la resistencia del mortero ($\beta_b / \beta_m < 1$).

Para alcanzar resistencias del hormigón más elevadas (es decir, resistencias mayores a las resistencias límites mencionadas en el punto 3.1.1), debe aumentar la resistencia del mortero en mayor medida que lo que aumente la resistencia del hormigón (**fig. 3.1-1, zona 2**). Es condición indispensable que los áridos no se destruyan prematuramente por rotura de los granos.

Por encima de la resistencia límite interviene también la cantidad de árido. La relación β_b / β_m será tanto peor cuanto mayor sea la cantidad de árido y menor la resistencia del mismo.

Relaciones numéricas sólo pueden obtenerse mediante ensayos.

3.1.1.3 Resistencia propia de los granos

La relación entre la resistencia del hormigón β_b , el módulo de elasticidad E_k , del árido y la resistencia del mortero β_m , mostrada en el punto anterior, sólo es válida mientras los áridos puedan absorber el esfuerzo σ_k correspondiente a la relación de rigidez E_k / E_m .

Si dicho esfuerzo sobrepasa la resistencia media de los granos σ_k la resistencia del hormigón queda por debajo del valor que debería tener según el punto anterior (**fig. 3.1-1 zona 3**).

La resistencia que puede alcanzar el hormigón queda en este caso notablemente limitada por la resistencia propia de los granos del árido. Un aumento de la cantidad y de la resistencia del mortero da lugar solamente a una mínima mejora de la resistencia del hormigón. Pero puede lograrse que ésta se aproxime al valor alcanzable con buenos áridos normales, utilizando áridos livianos de gran resistencia.

La resistencia del mortero β_m necesaria en este caso para la resistencia β_b que se pretende alcanzar, puede estimarse con ayuda de las tensiones comparativas σ_k . Se obtiene:

$$\beta_m = \frac{\beta_b - \sigma_k \sqrt[3]{V_k^2}}{1 - \sqrt[3]{V_k^2}}$$

Esta relación es válida en general y puede utilizarse para todas las zonas de resistencia para las que se obtuvo σ_k .

La ventaja de este procedimiento consiste en que puede juzgarse con una sola mezcla de ensayo la influencia de la rigidez y resistencia del árido.

De esta manera pueden eliminarse las complicadas investigaciones encaminadas a determinar estas propiedades del grano, cuyos resultados deben aceptarse con reservas en la mayoría de los casos.

3.1.2 Influencia de la resistencia del mortero

En la figura 3-1-1 se representa esquemáticamente la repercusión de la resistencia del mortero sobre la del hormigón. Según se indicó en el punto 3.1, la rigidez y la resistencia de los áridos tienen en ello importancia decisiva. Siempre que su rigidez sea como mínimo igual a la del mortero, la resistencia del hormigón coincide con la del mortero.

Esto sólo se cumple, incluso con los áridos de gran resistencia de que se dispone hoy día, en general hasta resistencias del hormigón de unos 300 kg/cm³.

Por encima de este valor la resistencia del hormigón crece más lentamente que la del mortero. El aumento de β_b es tanto menor cuanto más blando es el árido en relación con el mortero y cuanto mayor es el contenido de árido en el hormigón.

La resistencia del hormigón que puede alcanzarse elevando la resistencia del mortero queda notablemente limitada por la resistencia de los áridos livianos. Puesto que la parte de carga transmisible por los áridos disminuye de nuevo una vez sobrepasada la resistencia propia de los granos, decrece nuevamente el índice de aumento de la resistencia del hormigón.

A partir de un determinado valor la resistencia del hormigón no puede aumentar de forma rentable.

Por ejemplo, según la figura 2.2-4 no tiene sentido pretender conseguir un hormigón de resistencias > 150 kg/cm³ con la arcilla expandida, o tratar de conseguir resistencias del hormigón superiores a 400 kg/cm³ con la pizarra expandida.

3.1.3 Influencia de cada uno de los componentes de la mezcla

En los dos últimos puntos hemos presentado las influencias básicas de las propiedades de los áridos y de la resistencia del mortero sobre la resistencia del hormigón. A continuación se sacan consecuencias de lo allí expuesto y se estudian particularmente los efectos que se presentan en las propiedades más importantes del hormigón, principalmente la resistencia a la compresión y la densidad, cuando se varían los tipos y las cantidades de los distintos componentes de la mezcla.

3.1.3.1 Contenido de cemento

Según el Reglamento CIRSOC 202 el contenido mínimo de cemento en el hormigón liviano estructural es de 300 kg por m³ de hormigón puesto en obra. Este valor se ha establecido teniendo en cuenta sobre todo la protección contra la corrosión y la adherencia de la armadura, así como la docilidad del hormigón.

Un aumento del contenido de cemento, manteniendo en lo demás la misma composición de la mezcla, eleva en general la resistencia. Sin embargo, el aumento de la resistencia no es generalmente tan grande como en el hormigón normal. En la figura 3.3-1 se observa que un aumento del 20 % en el contenido de cemento produce en el hormigón normal una elevación de aproximadamente un 30 % de la resistencia del hormigón. Con hormigón liviano a base de áridos de pizarra expandida, el mismo aumento del contenido de cemento dio lugar a un aumento de aproximadamente sólo un 15 %.

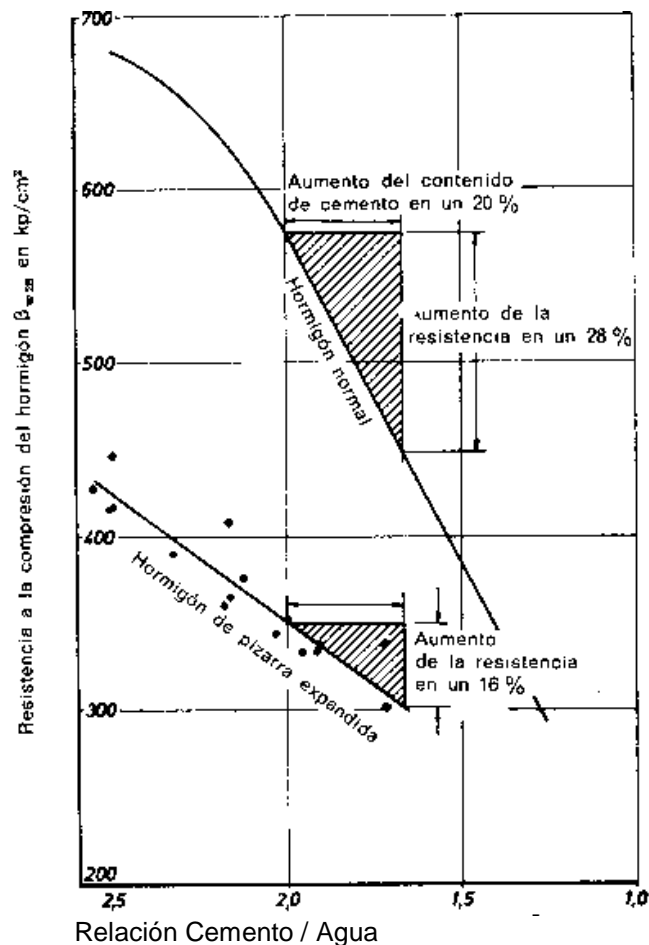


Figura3.3-1 Variación de la resistencia a la compresión del hormigón normal y del hormigón liviano, al modificar la cantidad de cemento.

El contenido de cemento necesario para obtener una determinada resistencia a la compresión depende de muchos factores. Son decisivas en primer lugar la rigidez y la resistencia de los áridos y el contenido de mortero o la cantidad de agua necesarios para poder amasar y verter sin dificultades el hormigón.

En cuanto a la facilidad de amasado y vertido es recomendable trabajar con mezclas más ricas en mortero que las similares en caso de hormigón normal. Contenidos de cemento superiores a 400 kg/m³ son ya muy antieconómicos, elevan muy poco la resistencia del hormigón y además influyen desfavorablemente en otras propiedades del hormigón. Elevan especialmente la retracción y la fluencia así como la producción de calor al fraguar, aumentando con ello el peligro de agrietamiento.

Dado que la densidad real del cemento es superior al doble de la densidad aparente de los áridos livianos, la densidad del hormigón aumenta algo al aumentar el contenido de cemento; un aumento de 50 kg/m^3 del contenido de cemento da una densidad del hormigón aproximadamente $0,03 \text{ kg/dm}^3$ más alta.

3.1.3.2 Cantidad de agua necesaria

El agua necesaria en una mezcla de hormigón liviano se compone de dos partes: el agua eficaz y el agua de los poros de los granos.

El agua eficaz, en general la parte mayor con mucha diferencia, es el agua que se encuentra en la pasta de cemento o en el mortero.

Influye esencialmente en la docilidad y en la resistencia del hormigón. Su cantidad depende principalmente del diámetro máximo de los granos, de la composición granulométrica del árido, de la forma de los granos y de las condiciones de superficie de los áridos, y, en menor medida, del contenido de cemento.

Son válidas las mismas relaciones y reglas que rigen en el hormigón normal con áridos compactos.

Oclusiones de aire, cuando se encuentran finamente distribuidas, mejoran la docilidad, pero disminuyen la resistencia en un valor similar al valor en que lo reduciría una misma cantidad de agua.

Contrariamente a la mayoría de los áridos normales, los áridos livianos absorben una notable cantidad de agua. Esta parte se denomina agua de los poros de los granos.

La absorción de agua depende, además de la permeabilidad de la superficie de los granos del árido y del tipo y cantidad de poros de los granos, y también del contenido de humedad de los áridos antes de su empleo, de la viscosidad de la pasta de cemento y del tiempo que dura el amasado y vertido.

No puede decirse exactamente cuanta agua se encuentra realmente en el interior de los granos del árido cuando empieza a notarse el fraguado del hormigón. La cantidad de agua de los poros de los granos puede averiguarse con cierta aproximación si se conocen las proporciones de la mezcla y la densidad aparente del hormigón antes del fraguado, mediante un cálculo basado en un supuesto volumen de oclusiones. También es posible una determinación aproximada con ayuda del valor de la absorción de agua por parte de los áridos durante media hora.

Manteniéndose idénticas las restantes condiciones (tipo, resistencia, rigidez y composición granulométrica del árido), la resistencia del hormigón y muchas otras propiedades del mismo quedan determinadas por la calidad de la pasta de cemento.

3.1.3.3 Composición granulométrica de los áridos

En el hormigón normal la composición granulométrica de los áridos influye prácticamente sólo en la determinación de la cantidad de agua de la mezcla, en vistas a una determinada docilidad.

Cuanto mayor es la proporción de granos finos, mayor es la cantidad de agua necesaria. Puesto que la cantidad de agua está íntimamente relacionada, a través de la relación agua-cemento, con la resistencia de la pasta de cemento y la del hormigón, un aumento en la proporción de granos finos, sin variar las restantes condiciones, produce de forma obligada una disminución de la resistencia del hormigón, o bien, cuando ésta viene dada de forma fija, produce una elevación de la cantidad de cemento precisada.

La proporción de grano grueso y el tamaño de dicho grano deberían elegirse siempre, en el caso de hormigón normal, tan grandes como lo permita una correcta elaboración de la mezcla.

La relación citada anteriormente entre la composición granulométrica y la cantidad de agua necesaria, o la resistencia, es válida también, en principio, para el hormigón liviano estructural.

Pero aquí deben tenerse en cuenta además otros puntos de vista. Al aumentar el diámetro de los granos en algunos áridos livianos, disminuyen el módulo de elasticidad, la resistencia de los granos y su densidad.

En tales casos, atendiendo a la resistencia del hormigón, resulta conveniente un menor diámetro de los granos mayores y una mayor proporción de granos finos. Evidentemente entonces al mismo tiempo aumenta la densidad del hormigón.

Si se disminuye por ejemplo el tamaño del grano mayor, de 25 a 16 mm, puede esperarse un aumento promedio de la resistencia de un 10 %. Son posibles aumentos mayores de la resistencia si se aumenta notablemente la proporción de granos de hasta unos 8 mm de diámetro, o se utilizan exclusivamente granos de este tipo.

Estas medidas provocan un aumento de la densidad del hormigón. En el primer caso, de alrededor de $0,03 \text{ kg/dm}^3$; en el último caso, de alrededor de $0,10 \text{ kg/dm}^3$.

CENTRO DE INVESTIGACIONES AVANZADAS EN TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN - CIATH
CÓRDOBA, ARGENTINA

La densidad del hormigón aumenta considerablemente si se emplea arena natural en lugar de áridos finos livianos. El hormigón liviano que contiene por ejemplo un 10 % en volumen de arena natural en lugar de arena de árido liviano, tiene una densidad alrededor de 0,10 kg/dm³ mayor; el módulo de elasticidad aumenta con ello, en general, alrededor de un 20 %.

A menudo se utiliza arena natural de cantera o de río debido a su bajo precio o para mejorar la docilidad del hormigón.

La mayoría de las arenas ligeras de que se dispone presentan una elevada proporción de granos mayores de 1 mm, lo cual disminuye fuertemente la facilidad para que los morteros obtenidos con ellas fluyan en los intersticios de la estructura formada por los granos gruesos.

La docilidad de los hormigones que contienen exclusivamente estas arenas deja a menudo que desear. Una sustitución parcial de los áridos livianos finos por arena natural de granulometría apropiada compensa el defecto.

Al añadir arena natural debe tenerse en cuenta que se aumenta la diferencia de densidad entre el mortero y el árido no fino.

Puede ocurrir que la viscosidad de la densa pasta de cemento no sea ya suficiente para evitar que floten los granos gruesos de menor peso. En tales casos una adición de un 1 a un 2 % de bentonita, referida al peso de cemento, debe producir un espesamiento suficiente de la pasta de cemento, para que no aparezca ninguna disgregación. Al añadir arena natural no se aumenta a menudo en absoluto la resistencia de los hormigones livianos con igual resistencia de la pasta de cemento. Esto se basa en las suficientes resistencia y rigidez de los granos finos, con menos poros que los de los áridos gruesos. Un aumento apreciable de la resistencia por una adición de arena natural, suponiendo igual la relación agua - cemento, es solamente de esperar si la resistencia del hormigón deseada está en las proximidades del límite superior alcanzable con el árido liviano en cuestión (fig. 3.1-1, zona 3).

Puesto que la forma de los granos de la arena, principalmente los de arena fina de menos de 1 mm, ejerce una fuerte influencia sobre la cantidad de agua necesaria (mucho más que la forma de los granos del árido grueso) la adición de arena natural, debido a la forma redondeada y a la superficie pulida del grano, mejora ostensiblemente en muchos casos la docilidad de las mezclas de hormigón liviano y con, ello eleva la resistencia del hormigón manteniendo la misma cantidad de cemento.

En cambio, los áridos livianos finos tienen a menudo granos de forma voluminosa o bien en ellos la superficie es áspera con poros abiertos. Con respecto a la cantidad de agua necesaria, se comportan tan desfavorablemente como las arenas naturales obtenidas por trituración.

Con vistas a una perfecta compactación del hormigón, a un buen recubrimiento de las armaduras y a la consecución de un buen acabado superficial, ha quedado probada la conveniencia de trabajar en el hormigón liviano con mezclas más ricas en mortero que en el hormigón natural de categoría similar. Muchas veces esto sólo se logra añadiendo arena natural.

En el hormigón liviano la parte que constituye el mortero (cemento, árido fino de 0-2 mm, agua eficaz y oclusiones de aire) debe estar comprendida entre 500 y 550 dm³/m³. El valor más alto es válido para cuando se utilizan arenas ligeras con baja proporción de granos finos.

Un contenido demasiado bajo de mortero origina dificultades en la compactación, produce estructuras con exceso de oclusiones y, por tanto, una disminución de la resistencia. Un contenido de mortero demasiado elevado favorece la flotación de los granos gruesos y origina disgregaciones. A menudo es recomendable emplear granulometrías discontinuas.

Cuando sólo se dispone, por ejemplo, de áridos livianos gruesos y el árido fino tiene que añadirse en forma de arena natural, se recomienda desechar totalmente la arena gruesa de más de 1 mm, puesto que cuanto más fina sea la arena añadida tanto mejor resulta la docilidad. En este caso bastan cantidades adicionales relativamente pequeñas (entre 20 y 30 %, en volumen, de todo el árido) y la densidad del hormigón se mantiene baja.

Al utilizar áridos finos livianos basta en la mayoría de los casos, para obtener una buena docilidad y para conseguir superficies con buen aspecto, elevar el contenido de los granos muy finos, añadiendo arena fina o polvo de piedra machacada.

En la pizarra expandida, que tiene una forma de grano más fragmentada que la arcilla expandida, para mejorar la docilidad ha resultado eficaz el elevar las cantidades de grano en polvo de un 5 a un 10 %.

Puesto que las propiedades importantes dependen, en el hormigón liviano en mayor grado que en el hormigón normal, de la composición granulométrica de la mezcla de áridos (influencia adicional de la resistencia propia de los granos, módulo *E* y densidad aparente de los granos, absorción de agua, etc.) la composición granulométrica elegida debe mantenerse lo más exacta que sea posible, para garantizar la uniformidad del hormigón.

Esto es posible solamente mediante una dosificación separada de grupos granulométricos finamente escalonados.

3.1.3.4 Aditivos en el hormigón liviano

Los aditivos del hormigón actúan básicamente, en este caso, de forma parecida a como actúan en el hormigón normal.

Los productos plastificantes mejoran la docilidad de las mezclas de hormigón liviano o posibilitan una disminución en la relación agua - cemento, manteniendo la consistencia del hormigón. Indirectamente aumenta entonces la resistencia del hormigón.

Según sea el modo de actuar del producto plastificante es posible que se introduzca una mayor parte del agua de amasado en los granos del árido y que, con igual cantidad total de agua, la mezcla parezca menos dócil. En tales casos hay que agregar el agua necesaria hasta conseguir la consistencia deseada.

A pesar del mayor contenido total de agua, el hormigón con fluidificante contiene menos agua eficaz, a igualdad de consistencia, que una mezcla análoga sin este aditivo y posee una relación agua - cemento inferior. Es por ello que cabe esperar en este caso una resistencia más elevada.

Los retardadores de fraguado prolongan el período de tiempo durante el cual el hormigón puede amasarse y colocarse en obra (por ejemplo, para evitar juntas de hormigonado). Su utilización en el hormigón liviano, que contiene áridos absorbentes, solamente es posible bajo ciertas condiciones.

Debido a la progresiva absorción de agua por los granos, el hormigón recién amasado se va volviendo rígido, aun cuando se retrase el fraguado de la pasta de cemento. Así se menoscaba la docilidad, no pudiendo aprovecharse el efecto retardador en determinadas circunstancias, o sólo parcialmente. Cuando se emplean retardadores debe compactarse el hormigón suficientemente ya antes de que empiece a volverse rígido. A pesar de esto disminuye el volumen de la pasta de cemento, debido a la progresiva absorción de agua por los áridos.

El endurecimiento prematuro del hormigón liviano, aún utilizando un retardador de fraguado, puede evitarse mojando antes, abundantemente, los áridos. Pero en este caso debe contarse con que algunas propiedades del hormigón pueden verse (por lo menos durante un período de tiempo) desfavorablemente afectadas (por ejemplo, la densidad de los granos, la conductibilidad del calor, la resistencia a la congelación-descongelación, el peligro de agrietamientos como consecuencia de las tensiones internas de retracción).

Utilizando un aireante puede disminuirse la densidad del hormigón. Esta disminuye, al aumentar las oclusiones de aire en un 3 %, en alrededor de $0,05 \text{ kg/dm}^3$.

Las oclusiones hacen la pasta de cemento, más pegajosa; en este sentido se comparten de forma parecida a como lo haría un aumento de la cantidad de polvo contenida en el árido. Debido a ello y también a igualarse las densidades de la pasta de cemento y de los áridos, disminuye claramente, la tendencia a la disgregación.

Las oclusiones de aire mejoran las condiciones de trabajabilidad, pero varían la consistencia del hormigón en medida mucho menor que una cantidad igual de agua. Debido al aumento de la relación agua - cemento debe contarse con una disminución de la resistencia.

A consecuencia de la porosidad de los granos de los áridos, esto puede ser especialmente peligroso en casos límite debido a que, con los medios conocidos hasta hoy, no es posible, una medición del contenido de oclusiones de aire en la pasta de cemento.

Los efectos anteriormente citados de las oclusiones de aire sobre las propiedades del hormigón son sólo secundarios. Lo que hace decisivo el uso de aireantes es la elevación de la resistencia al congelación-deshielo, en presencia o no de sales.

Para obtener las cantidades más convenientes de aditivo y para el control de su eficacia, es preciso realizar ensayos en hormigones comparables con aditivo y sin él.

3.2 Producción del hormigón

3.2.1 Pretratamiento de los áridos

Al fabricar hormigón normal lo mismo da que toda el agua precisa para formar la masa no se añada hasta el momento de realizar la mezcla o que, en parte, ya se encuentre contenida en el árido acopiado en forma de humedad superficial. El grado de humedad de los áridos livianos en el momento de elaborar el hormigón influye notablemente, por el contrario, sobre determinadas propiedades, antes y después de fraguar, de los hormigones livianos fabricados con ellos.

Al utilizar áridos secos, debe contarse con que el hormigón se volverá notablemente menos dócil durante la operación de mezclado y, principalmente, en el período de tiempo subsiguiente, hasta su puesta en obra y compactado (hormigón transportado).

Por el contrario, los áridos livianos ceden sólo parcialmente y en largos períodos de tiempo el agua que previamente han absorbido. Esto produce un aumento considerable de la densidad del hormigón, que sólo puede eliminarse muy lentamente.

Una humidificación excesiva de los áridos no es conveniente tampoco, principalmente a causa de la protección contra el calor, puesto que el coeficiente de conductibilidad térmica del hormigón crece sensiblemente al aumentar la humedad. Además puede suceder que un exceso de áridos mojados aumente las tensiones internas de retracción y con ello el peligro de agrietamiento en las zonas exteriores del hormigón, al secarse.

Al ceder el agua de los poros de los granos a la pasta de cemento, ésta puede expandirse a lo largo de mucho tiempo, sobre todo en el interior de las piezas gruesas, mientras que las zonas próximas a la superficie exterior se secan más rápidamente y empiezan a contraerse.

Con áridos muy saturados pueden quedar además perjudicadas la resistencia mecánica y la resistencia a la congelación y descongelación de los hormigones.

Debido a los motivos citados resulta ventajoso, en conjunto, utilizar áridos secos. Esto encarece el producto, puesto que tienen que protegerse los áridos contra la lluvia en la planta de fabricación, durante el transporte y en la obra. Por otra parte, la elaboración de hormigones con áridos secos presenta a menudo algunos inconvenientes. Los áridos, debido a su poder de absorción, toman agua de la pasta de cemento, con lo que el hormigón fresco pierde rápidamente docilidad, siendo más difícil su compactación.

En áridos con absorción de agua no muy elevada, y en aquellas obras en las que el tiempo que transcurre entre la preparación de la mezcla y su puesta en obra no varía mucho, es desde luego posible contrarrestar la rigidez ulterior mediante una consistencia inicial más blanda.

Pero muchas veces no puede evitarse el trabajar con áridos livianos previamente mojados, ya sea porque no es posible un almacenaje seco de los mismos, o bien porque las características de la obra exigen una consistencia que permanezca invariable durante largo tiempo. En tales casos debe limitarse la humidificación de los áridos al mínimo posible.

Tienen que almacenarse en la estación de mezclado de forma tal que puedan evitarse variaciones de humedad debidas a fenómenos exteriores, como la lluvia. Si los áridos tienen que mojarse antes de su dosificación, tiene que asegurarse el mantenimiento de un grado de humedad constante.

3.2.2 Dosificación de los ingredientes

Así como, por motivos de exactitud, deben dosificarse siempre en peso el cemento, los aditivos en polvo, los materiales adicionales y los áridos naturales densos, los áridos livianos pueden dosificarse fundamentalmente bien según su masa (peso) o según su volumen.

En las instalaciones mezcladoras bien equipadas, para hormigón normal, los áridos se dosifican actualmente casi sólo según su masa (peso). Así puede conseguirse mayor exactitud en las mezclas, que al efectuar adiciones según volumen, en donde las diferencias de contenido de humedad, sobre todo en los grupos granulométricos finos, conducen a densidades de árido muy diversas.

En los áridos livianos varía también la densidad de almacenamiento con la humedad propia (efecto de esponjamiento). Pero debido a la absorción de agua por los granos porosos, que a menudo es considerable, junto con una baja densidad aparente de los granos, la masa (peso) queda ,más influida por una distinta humedad de los granos que por la compacidad con que está almacenado.

Una determinación constante de la humedad, para corregir las pesadas, es muy costosa. Puesto que la humedad puede sufrir grandes variaciones según el lugar de donde se tome la muestra, las pequeñas pruebas no garantizan una composición uniforme del hormigón. Por esto los áridos livianos de grano grueso, es mejor medirlos, en general, en volumen, lo que es más sencillo y digno de confianza.

Así, en los grupos granulométricos mayores de 4 mm no es necesario tener en cuenta la humedad propia. Pero esto no es válido para la arena de los áridos livianos. En este caso, la humedad propia debe tenerse en cuenta aun cuando se hagan las mediciones según volumen.

Independientemente de esto, deberían tomarse todas las medidas para conseguir que las variaciones de humedad, mientras transcurre la preparación y puesta en obra del hormigón, sean lo más pequeñas posible.

Debido a que la densidad aparente de la arena de árido liviano es la más sensible a las variaciones de humedad, se recomienda medirla, en lo posible, en estado seco.

En el grano fino es posible ahorrarse, sin más, el premojado. Dado que la absorción del agua se produce muy rápidamente, debido a su gran superficie, y en su parte principal finaliza ya

durante el mezclado, le quita poca agua a la pasta de cemento, una vez que ha salido, del mezclador. Es por ello que no debe temerse aquí que el hormigón fresco se vuelva rígido con demasiada rapidez.

Al añadir el agua debe tenerse siempre en cuenta la humedad propia del árido. La cantidad de agua a añadir se controlará observando la consistencia en la hormigonera.

3.2.3 Mezclado

Para el mezclado del hormigón liviano con estructura cerrada pueden utilizarse hormigoneras forzadas o de caída libre.

Las primeras son especialmente apropiadas, puesto que garantizan una mezcla uniforme, aprovechando toda la efectividad del aglomerante empleado. Las hormigoneras de caída libre, mediante el movimiento de rodamiento del material a mezclar, de forma parecida a un plato granulador, favorecen la formación de aglomerados de cemento perniciosos.

El peligro de la formación de grumos es particularmente elevado en mezclas pobres en agua y con mucho cemento, como se precisan a menudo para obtener buenas calidades de hormigón.

Además, en la hormigonera de caída libre se forman fácilmente adherencias de cemento y de los ingredientes finos de los áridos en las paredes del tambor mezclador; debido a que el frotamiento con los áridos livianos no basta para eliminar la capa de recubrimiento que allí se origina.

Ambos fenómenos pueden contrarrestarse solamente, de ser posible, añadiendo desde el principio toda el agua de amasado. De todos modos, es mejor disponer de hormigoneras forzadas de gran rendimiento.

Para efectuar la mezcla lo mejor es echar primero en la hormigonera los áridos livianos.

Seguidamente, con la hormigonera en marcha se añaden inmediatamente, por lo menos 2/3 del agua de amasado necesaria, mezclando el total unos 30 segundos.

Una vez añadido el cemento y el agua restante, debe mezclarse todavía durante 1,5 minutos.

Los aditivos en polvo se añaden al cemento, mientras que los aditivos líquidos es mejor que se mezclen con el resto del agua de amasado. Estos últimos no deben en absoluto llegar a los áridos secos, puesto que serían en parte absorbidos de forma no controlable por éstos, y debido a ello perderían efectividad sobre las propiedades del hormigón fresco y fraguado.

Si se utilizan áridos secados en horno tiene que aguardarse un poco, con la hormigonera parada, después del premojado, antes de añadir el cemento, para que los áridos livianos puedan absorber tanta agua que después del mezclado no tenga lugar una variación de la consistencia demasiado rápida.

De cuando en cuando hay que poner en movimiento, un corto tiempo, la hormigonera, para alcanzar una absorción uniforme de agua.

No debe temerse nada contraproducente si se dan tiempos de mezclado superiores a los corrientes de 1,5 a 2 minutos.

En la práctica no se han observado trituraciones de los granos dignas de mención, en los áridos resistentes apropiados para el hormigón liviano estructural, debidas a las herramientas de mezclado, como aparecen a veces en los áridos poco resistentes que se emplean para hormigones aislantes.

Una larga duración del mezclado es ventajosa la mayoría de las veces, puesto que influye beneficiosamente en la docilidad del hormigón fresco.

3.3 Propiedades del hormigón fresco

3.3.1 Consistencia

Los procesos de ensayo utilizados en el hormigón normal para la determinación de la consistencia sirven en general también para el hormigón liviano con estructura cerrada. De los numerosos métodos, aquí interesan solamente aquellos que pueden proporcionar en la práctica, de forma rápida, una información suficiente, de tal modo que, de ser preciso, puedan todavía efectuarse correcciones en la composición de la mezcla.

Una realización rápida y simple de la prueba y una buena posibilidad de reproducirla resultan más importantes que una exactitud exagerada.

Para la determinación de la consistencia del hormigón fresco se utiliza el ensayo de asentamiento (cono de Abrams) descrito en la norma IRAM 1536.

Con este ensayo se determina la consistencia por la pérdida de altura, expresada en centímetros, de un cierto volumen de hormigón fresco de forma determinada, al ser retirado el molde que lo contiene, siendo la consistencia la capacidad de deformarse del hormigón en relación a su fluidez.

3.3.2 Densidad aparente del hormigón fresco

La densidad aparente del hormigón fresco puede obtenerse con suficiente exactitud directamente de la masa y el volumen que tiene, después de alisada la superficie de las probetas cilíndricas (15cm. de diámetro y 30cm. de altura) moldeadas para el ensayo de resistencia a la compresión.

El moldeo se realiza en las condiciones establecidas por la norma IRAM 1524, teniendo en cuenta el método de compactación empleado en obra.

3.4 Transporte, puesta en obra y compactado

3.4.1 Transporte

Reflexiones de tipo económico y de organización son la base principal del desarrollo de la elaboración de hormigón liviano en planta. Pero también está a favor del uso del hormigón liviano transportado el hecho de que la elaboración de hormigón liviano en la obra exige precauciones especiales de tipo técnico y personal adecuado.

Esta mayor complicación hace que no resulte siempre rentable. Especialmente en obras pequeñas o allí donde se utiliza poca cantidad de hormigón liviano parece adecuado el uso de hormigón liviano elaborado en central.

En el transporte del hormigón liviano deben, en principio, observarse las mismas reglas que en el hormigón normal. En el hormigón liviano se da la dificultad de que los áridos porosos sustraen agua a la pasta de cemento en el transcurso del tiempo, lo cual produce cierta falta de docilidad en el hormigón fresco. En todos los casos es esencial que tenga la debida consistencia en el momento del vertido.

Existen tres posibilidades para lograr la docilidad deseada en el suministro:

- a) Abundante humidificación de los áridos livianos antes de añadir los restantes componentes de la mezcla, de manera que no tenga lugar en el hormigón una absorción de agua digna de tenerse en cuenta.
- b) Fijación de la consistencia en un valor establecido mediante ensayos previos.
- c) Corrección de la consistencia inmediatamente antes de la entrega en el lugar de utilización.

Respecto a la posibilidad a) debe tenerse en cuenta que un contenido elevado de agua en los poros de los granos puede influir negativamente sobre diversas propiedades del hormigón, como por ejemplo la densidad, la conductibilidad térmica, la resistencia a la congelación y descongelación y la retracción. Además es muy difícil de realizar una humidificación previa uniforme de los áridos. Dado que en las centrales de producción de hormigones se realiza la dosificación principalmente según la masa (peso), con lo que las variaciones de la humedad influyen de forma relativamente intensa sobre la cantidad medida, la utilización de áridos prehumidificados puede dar lugar a variaciones no deseadas en la composición del hormigón.

Por ello no debería trabajarse, en lo posible, según el procedimiento a), sino que en general debería utilizarse el procedimiento de fijación de la consistencia b). Pero en casos favorables, principalmente con áridos livianos muy absorbentes y largas duraciones de transporte, puede también ser adecuada la adición posterior de agua en forma controlada, según c), que repone el agua sustraída a la pasta de cemento por la absorción de los granos.

Tal medida no influye sobre la resistencia, puesto que la relación agua cemento no varía. Por el contrario, de no añadir posteriormente agua debería esperarse una disminución de la resistencia, ya que el hormigón de consistencia demasiado seca ofrece dificultades para compactarse.

Debido a la mayor efectividad de mezclado en las hormigoneras forzadas que existen en la mayoría de las plantas de fabricación de hormigón, se prefiere el hormigón liviano elaborado.

El vehículo mezclador, que en la mayoría de los casos es como una hormigonera de caída libre, tiene que evitar únicamente la dispersión posterior durante el transporte.

El mezclado exclusivo en el vehículo resulta problemático con hormigón liviano, debido al peligro de formación de grumos de pasta de cemento y de adherencias de cemento en las paredes del tambor, y debería limitarse también a hormigones plásticos blandos, con pocas exigencias respecto a la resistencia. Con los áridos adecuados para el hormigón liviano estructural, relativamente resistentes, no es preciso, según muestra la práctica, limitar el tiempo de mezclado para evitar un desgaste excesivo de los gruesos.

Para mejorar la uniformidad de mezclado del hormigón liviano transportado, deberían darse unas 10 vueltas a velocidad normal (alrededor de 10 vueltas por minuto) inmediatamente antes de su

entrega en la obra, mientras que durante el tiempo restante basta con remover lentamente, de 2 a 6 vueltas por minuto.

Para continuar el transporte del hormigón normal desde el camión hasta el puesto de empleo en la obra, se utilizan cada vez con mayor frecuencia las autobombas para hormigón.

El bombeo del hormigón liviano ofrece muchas dificultades. Debido a la sobrepresión necesaria para desplazar el hormigón por el tubo, una parte considerable del agua del amasado se introduce en los poros de los granos quedando eliminada de la pasta de cemento.

Además, la mezcla de hormigón liviano adquiere rigidez en el interior del tubo, perdiendo en movilidad. El grado de rigidez depende de la absorción adicional de agua por los áridos, al elevar la presión.

Aquellos áridos en que este valor es pequeño son más apropiados para la fabricación de hormigones aptos para ser bombeados. No se conocen hasta hoy métodos de ensayo para juzgar los áridos a este respecto. Con los áridos utilizados actualmente, pueden bombearse sólo mezclas de consistencia blanda. Y aún así, sólo es posible en recorridos cortos, en los que es suficiente una presión baja.

La presión de bombeo necesaria aumenta aproximadamente de forma lineal con la longitud del conducto. Pero al aumentar la presión, la consistencia se hace rápidamente más rígida, taponando el conducto. Es posible ampliar el recorrido por encima de lo normal utilizando procedimientos de transporte neumáticos, o una combinación de dispositivos neumáticos e hidráulicos, aun limitando la presión de transporte a 5 atmósferas efectivas.

Para ello, la columna de hormigón que se halla en el interior del conducto se divide en segmentos de longitud determinada inyectando, a intervalos, aire a presión. Con una relación volumétrica entre hormigón y aire comprimido igual a 1:3 se encuentra, por ejemplo, en un conducto de 40 m de longitud, un total de sólo 10 m de hormigón.

Esto significa que la resistencia al transporte (pero con menos cantidad transportada) queda sensiblemente disminuida.

Una parte considerable del agua introducida, por la presión de bombeo, en los poros de los granos permanece en los áridos aun después de la salida del hormigón del conducto. La consistencia del hormigón bombeado es por lo tanto sensiblemente más seca que antes. Además, su densidad aumenta por el bombeo de forma insignificante.

Para poder emplear sin dificultad el hormigón después de bombeado, se precisa prever un grado de consistencia que se encuentre dentro de un amplio campo. Un hormigón de esta clase no debe emplearse en ningún caso sin el transporte por bomba previsto, ya que la eliminación de agua debida al bombeo no tendrá lugar. Esto conduciría a una relación agua - cemento excesivamente elevada y por tanto a un empeoramiento considerable de algunas propiedades esenciales del hormigón, como por ejemplo la resistencia y la adherencia.

En resumen, el bombeo del hormigón liviano es todavía hoy en día problemático, puesto que las consecuencias de este tipo de transporte sobre la consistencia y la resistencia del hormigón son difíciles de predecir. En todo caso se aconseja realizar pruebas apropiadas que tengan en cuenta en cada caso las condiciones existentes.

3.4.2 Puesta en obra

Las reglas fundamentales para el empleo del hormigón normal son válidas también para la introducción en el encofrado y para el compactado del hormigón liviano con estructura cerrada.

La finalidad de estas reglas consiste en producir un hormigón lo más uniforme posible, compacto, sin formación de oquedades perjudiciales, con suficiente recubrimiento de las armaduras y con superficie de aspecto perfecto.

En los elementos de construcción de gran altura, contenidos en encofrados verticales, como por ejemplo paredes, se ha comprobado en el hormigón normal que resulta conveniente prescindir del grano grueso en una zona de 10 a 20 cm por encima del fondo del encofrado, para evitar la formación de oquedades en la zona inferior.

En el hormigón liviano puede no resultar esto conveniente, puesto que así se varía notablemente el coeficiente de conductibilidad térmica.

La disminución del aislamiento térmico puede producir zonas sombreadas en la superficie visible. Por ello se recomienda sustituir el grano grueso por el grupo granulométrico medio 4/8 mm, en lugar de hacerlo por mortero, ya que así se influye con menor intensidad sobre la resistencia al paso del calor.

No hay que temer, en general, una disminución de la resistencia a consecuencia de la mayor cantidad de agua que con ello se precisa, puesto que la disminución del diámetro del grano da lugar corrientemente a un aumento de la resistencia.

El hormigón debe verterse por el centro del encofrado. En caso de que la altura de caída sea grande deben utilizarse embudos provistos de las llamadas trompas de elefante. La distancia entre los puntos de llenado tiene que ser más reducida en el hormigón liviano que en el normal, puesto que debido a su poco peso se dispersa menos hacia los lados. Por el contrario, y debido precisamente a ello, puede repartirse mejor manualmente. Hacerlo desplazar lateralmente mediante vibración es prácticamente imposible, y poco aconsejable debido al peligro de segregación.

3.4.3 Compactación

El hormigón liviano estructural se compacta casi exclusivamente por vibrado. Este ocasiona mayores gastos que con el hormigón normal. Por una parte, el menor peso del hormigón, debido a su baja densidad, no ayuda al compactado en igual medida, y por otro lado los áridos porosos livianos amortiguan fuertemente las vibraciones, disminuyendo con ello el radio de acción del vibrador.

El número de puntos de inmersión debe por tanto doblarse, o bien disminuirse correspondientemente su distancia cuando se emplean vibradores de encofrado.

Han dado buen resultado en la práctica los vibradores interiores de 9000 a 12000 vibraciones / minuto, con diámetros de aguja de 50 a 70 mm. Las distancias entre los puntos de inmersión no deberían superar los 25 cm.

Para aprovechar de manera óptima la fluidificación del hormigón fresco originada por las vibraciones, los vibradores deberían funcionar sin interrupción durante toda la operación del vertido, puesto que en los períodos en que no hay vibración los áridos, con poder absorbente, hacen que el hormigón adquiera rápidamente cierta rigidez. Por el mismo motivo, es conveniente instalar el mayor número posible de vibradores. En condiciones difíciles de hormigonado y en el hormigón visto debería disponerse el doble de vibradores que en el hormigón normal, para mayor seguridad.

Al hormigonar en encofrados horizontales (techos, elementos prefabricados para paredes) debe evitarse especialmente en mezclas blandas un vibrado excesivamente largo porque los áridos gruesos livianos flotan, mientras que el mortero, más pesado, se hunde. Esto origina un enriquecimiento de cemento en el fondo, con lo que se aumenta el peligro de formación de grietas.

Aquí se da precisamente un efecto opuesto al hormigón normal, en donde un vibrado excesivo origina un aumento de mortero en la parte superior del hormigón.

Para conseguir un acabado de superficies correcto con hormigones livianos, debería utilizarse un hormigón de buena cohesión y lo más rígido posible. Se ha comprobado que resulta especialmente adecuada la utilización de vigas vibrantes. Los áridos livianos que flotan pueden mantenerse hundidos mediante placas vibrantes con orificios pequeños. Al mismo tiempo se produce un enriquecimiento de la superficie con mortero fino, lo que facilita el alisado final. Esto debería realizarse en lo posible, después de que el agua aflorada por arriba vuelva a ser absorbida por el hormigón, o bien se haya evaporado.

3.5 Curado

3.5.1 Humedad

El tratamiento posterior o curado del hormigón debe seguir siempre inmediatamente después de la puesta en obra. Esta condición es válida aún con mayor importancia para el hormigón liviano.

Debido a su menor resistencia a la difusión del vapor de agua, ha de contarse con un secado más rápido. Con ello se perjudica la hidratación y se favorece la aparición de grietas de retracción. Para evitar esto, debe conservarse la humedad de amasado o bien se ha de realizar una humidificación adicional. Deben protegerse las superficies del hormigón, cubriéndolas con tejido húmedos, rociándolas con agua, colocando encima láminas de plástico o aplicándoles una película de curado.

Un tratamiento de siete días es suficiente, en general, con temperaturas superiores a + 10°C. Si el encofrado se quita muy pronto, en días secos y ventosos deben protegerse también contra el secado las superficies que han quedado libres.

3.5.2 Temperatura

Especial atención hay que poner, en el hormigón liviano, a la variación de la temperatura debida al calor de hidratación del cemento. Al endurecerse, los hormigones livianos se calientan más que los normales.

El motivo es principalmente la menor capacidad calorífica de los áridos livianos, debida a la poca densidad de los granos. Además, el calor producido por la hidratación fluye más lentamente debido a su poca conductibilidad térmica.

Por otra parte, la mayoría de los hormigones livianos precisan un mayor contenido de cemento que los normales de igual resistencia, desarrollando por ello más calor de hidratación.

La temperatura de la superficie del hormigón liviano fue aproximadamente igual a la de la del normal.

La diferencia de temperatura entre la periferia y el núcleo es en el hormigón liviano aproximadamente el triple, correspondiendo a sus tres veces mayor capacidad de retención del calor. Esto indica que las capas próximas a la superficie en el hormigón liviano se enfrían en comparación más fácilmente, debido a que el flujo de calor proveniente del interior resulta fuertemente obstaculizado.

Con ello se origina un pronunciado gradiente de temperatura, que favorece la formación de grietas superficiales.

Para evitar esto debe llevarse mucho cuidado con los elementos constructivos de hormigón liviano, para que sus superficies no sufran ningún enfriamiento intenso ni repentino.

Igual como en el hormigón normal, las siguientes medidas son las indicadas: tapar con material aislante del calor las superficies frescas del hormigón que entran en contacto con el aire, utilizar encofrados que dificulten el paso del calor, y no quitarlos demasiado pronto, cerrar el lugar de trabajo y, si es preciso, suministrar calor desde el exterior.

El agua utilizada para el mantenimiento de la humedad durante el curado no debe ser excesivamente fría y no debe ser suministrada en demasiada cantidad, para evitar un contraste brusco de temperaturas.

3.6 Propiedades del hormigón endurecido

3.6.1 Resistencia a la compresión y densidad aparente

La resistencia a la compresión y la densidad aparente son los dos valores característicos más importantes en el hormigón liviano, debiéndose por ello comprobar siempre antes de empezar la obra.

Puesto que los hormigones livianos con estructura cerrada generalmente contienen aproximadamente un 70 % en volumen de áridos, su densidad depende en primer lugar de la de los granos de los áridos de la mezcla. Además del tipo de árido, y al contrario de lo que ocurre con los áridos normales, aquí es importante también la composición granulométrica, puesto que las densidades de los granos de los distintos tamaños presentan grandes diferencias entre sí. En algunos áridos la densidad aparente disminuye con el diámetro del grano.

Una curva de cribado rica en partes finas o un diámetro menor de los granos más grandes conducen en ambos casos a una mayor densidad del hormigón y muchas veces también a una mayor resistencia.

La sustitución de los áridos livianos finos por arena natural, más pesada, aumenta también la densidad del hormigón. El hormigón liviano en el que el 20 % en volumen de los áridos es arena natural en lugar de arena ligera es alrededor de 0,2 kg/dm³ más pesado.

Puesto que la adición de arena natural favorece la docilidad del hormigón fresco, la cantidad de agua necesaria para obtener igual consistencia es menor. Esto produce en ciertos casos una elevación de la resistencia, pero con igual valor de la relación agua – cemento la resistencia permanece prácticamente invariable.

La figura 3.6-1 muestra la dependencia entre la resistencia a la compresión y la densidad aparente en seco, de los hormigones livianos elaborados con distintos áridos.

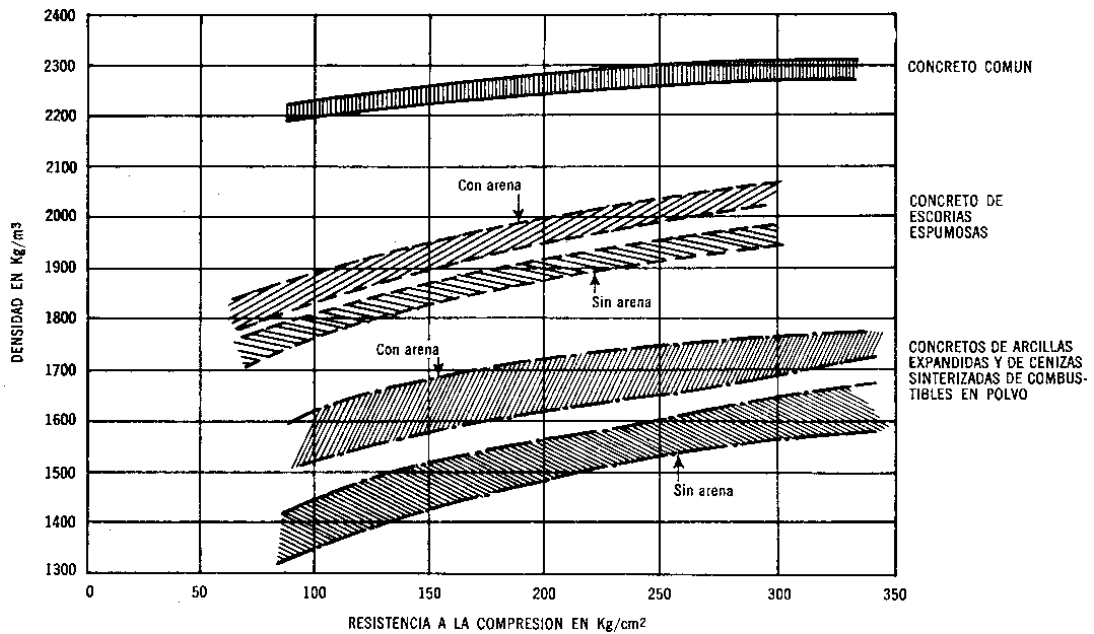


Figura 3.6-1 Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad de varios tipos de concretos.

Al aumentar la resistencia, en todos los áridos estudiados, aumenta la densidad del hormigón aproximadamente en igual medida sin alcanzar todo el campo de resistencias. Esto se debe a que al aumentar la resistencia disminuye el contenido en áridos livianos, aumentando la proporción de la masa de cemento, más pesada.

El ahorro de peso en los hormigones livianos, en comparación con los hormigones normales de igual categoría, en el supuesto de que están constituidos por áridos a base de arcilla y pizarra expandidas, con o sin arena natural, es de alrededor del 25 al 40 %.

La clase de árido ejerce una influencia cuantitativamente imprevisible sobre la variación de la resistencia y el endurecimiento posterior. Por ello no es tampoco posible dar un valor válido en general para la relación entre la resistencia inicial y la correspondiente a los veintiocho días.

La variación de la resistencia del hormigón liviano almacenado en estado constantemente húmedo coincide sólo con la del hormigón normal si la resistencia final que se pretende queda comprendida en una zona en donde la resistencia y la deformabilidad de los áridos no son todavía determinantes del agotamiento del hormigón.

De no ser así, la resistencia del hormigón crece más lentamente que la del mortero. En estas circunstancias, puede alcanzarse la resistencia final prácticamente a los siete días.

El endurecimiento posterior (relación β_7 / β_{28}) depende en general de la clase del cemento utilizado. Solamente resulta igual al crecimiento correspondiente en el hormigón normal, cuando la resistencia final queda por debajo del límite en el que los granos del árido se convierten en la parte más débil de los materiales que constituyen el hormigón.

En otro caso, el valor del endurecimiento posterior depende también del contenido de cemento, además de depender de las propiedades del cemento y del árido.

Al aumentar el contenido de cemento, a resistencias iniciales iguales corresponden resistencias finales menores.

3.6.2 Relación entre tensiones y deformaciones, módulo de elasticidad

La deformabilidad del hormigón, compuesto de varias materias, es función de la deformabilidad de éstas: la pasta de cemento o mortero y los áridos. En este sentido, en el hormigón liviano rigen básicamente condiciones distintas de las que rigen en el hormigón normal.

En el hormigón normal los granos del árido, muy rígidos, están incrustados en la masa de mortero, comparativamente blanda. Debido a ello, cuando está bajo carga, las tensiones se concentran en los áridos.

Pero éstos no están, en general, en contacto directo entre sí, sino que están separados por capas intermedias de mortero, lo que significa que estas películas de mortero tienen que transmitir una carga adicional relativamente grande. De ahí que sufran, en conjunto, un esfuerzo grande.

En el hormigón liviano, los áridos representan la parte más flexible. Por consiguiente, el mortero sufre, de por sí, mayor carga. En cambio el esfuerzo adicional del mortero debido a la transmisión de la parte de carga soportada por el árido es pequeño.

Puesto que el comportamiento bajo carga de ambos tipos de hormigón se diferencia sustancialmente, debido a los motivos citados, se comprende que entre el módulo de elasticidad del hormigón y el de sus dos componentes, existan relaciones de índole distinta en cada caso. Para su estudio podemos utilizar los modelos propuestos en la fig. 3.6-2.

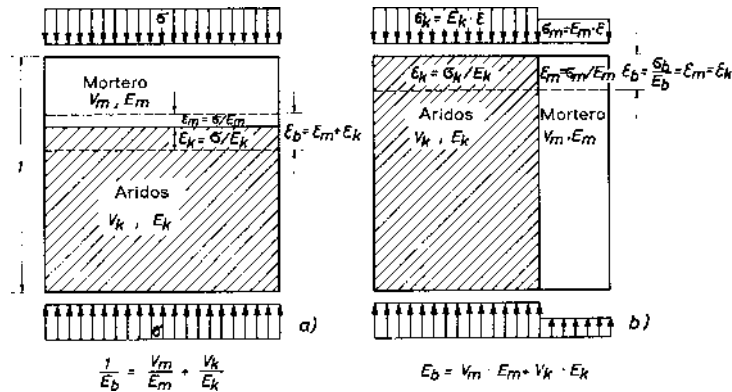


Figura 3.6-2 Sencillos modelos estructurales del hormigón
a) para hormigón normal
b) para hormigón liviano

En el modelo correspondiente al hormigón normal, la parte rígida (árido) y la flexible (mortero) actúan una detrás de otra y bajo la misma tensión (Fig. 3.6-2 a). Puesto que los granos se comprimen menos que el mortero, más blando, debido a su mayor módulo E, se originan variaciones de forma que engendran deformaciones por esfuerzo cortante en la proximidad de la superficie de los granos. Si no se tiene en cuenta la influencia que esto tiene sobre la rigidez del conjunto, el módulo de elasticidad del hormigón se calcula partiendo de la relación:

$$\frac{1}{E_b} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_k}{E_k}$$

en donde:

- V_m = Proporción del mortero, en volumen (m^3 mortero / m^3 hormigón)
- E_m = Módulo de elasticidad del mortero (kg/cm^2)
- V_k = Proporción de los áridos, en volumen (m^3 árido / m^3 hormigón)
- E_k = Módulo de elasticidad de los áridos (kg/cm^2)

Para el hormigón liviano es más adecuado el modelo que se muestra en la figura 3.6-2 b). Aquí los componentes rígidos (en este caso, el mortero) y los flexibles (áridos) actúan paralelamente.

Cuando el conjunto se ve solicitado por un esfuerzo, ambos componentes experimentan los mismos cambios de longitud, repartiéndose la carga soportada en proporción a su rigidez. La relación entre el módulo E del hormigón liviano y el módulo E de los materiales que los forman es por lo tanto:

$$E_b = V_m \cdot E_m + V_k \cdot E_k$$

Para la determinación previa mediante cálculo, del módulo E del hormigón, las funciones mencionadas tienen una aplicación limitada, puesto que, sobre todo en los hormigones livianos, el módulo E de los componentes del hormigón muy raramente se conoce con exactitud.

Se obtienen las siguientes conclusiones, del estudio de las ecuaciones anteriormente planteadas:

1. El módulo de elasticidad del hormigón liviano depende en mayor medida de la rigidez de los áridos que el del hormigón normal. Si el módulo de elasticidad de los áridos varía en el valor ΔE_k , el módulo E del hormigón liviano varía aproximadamente en $0,7 \Delta E_k$ y el del hormigón normal, por el contrario, sólo en un valor entre $0,1$ y $0,3 \Delta E_k$.
2. El módulo de elasticidad del hormigón, aparte de depender de la rigidez de los componentes del material, también depende de las proporciones del mortero y del árido. En la figura

3.6-3 se da la variación del módulo E del hormigón en relación con el contenido de mortero. Para una calidad de mortero constante el módulo E en el hormigón liviano aumenta linealmente al aumentar el contenido de mortero. Al aumentar el contenido de mortero alrededor de $100 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ el módulo E aumenta en un 12 %, aproximadamente, bajo las condiciones dadas. En el hormigón normal el módulo E , por el contrario, disminuye, al aumentar el contenido del mortero, en un 7 % por cada $100 \text{ dm}^3/\text{m}^3$.

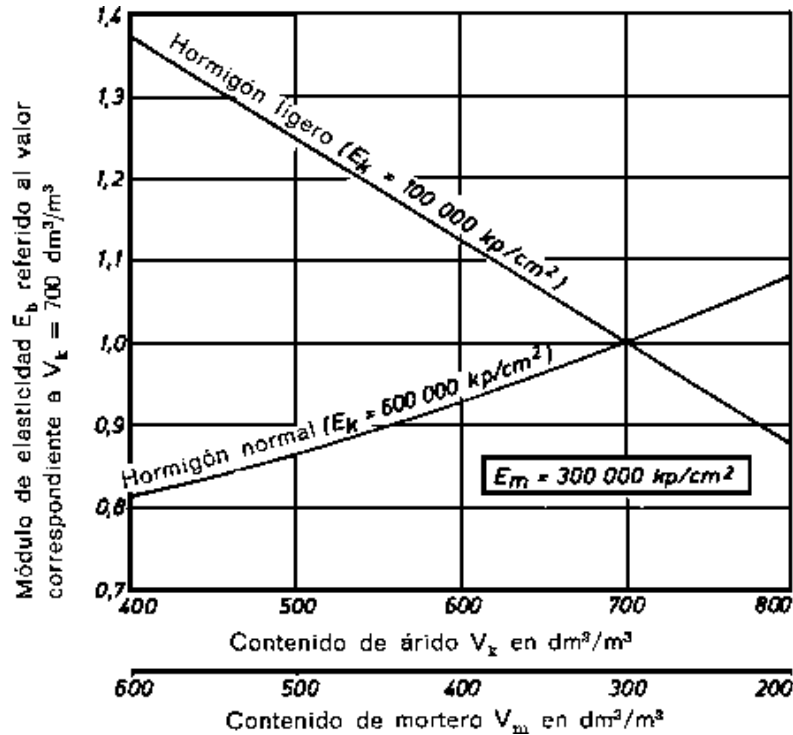


Figura 3.6-3 Influencia del contenido de mortero sobre el módulo de elasticidad del hormigón normal y liviano.

3. Un hormigón liviano con elevada resistencia presenta generalmente un mayor contenido de mortero y una mejor calidad del mismo (resistencia, rigidez). En el hormigón normal estos factores influyen contrariamente. Su módulo E crece al aumentar la calidad del mortero, pero disminuye al aumentar el contenido de mortero. En el hormigón liviano ambos factores aumentan el módulo E . Y además para obtener resistencias más elevadas se suelen utilizar áridos livianos más resistentes y rígidos.

Debido a estos motivos en el hormigón liviano se encuentran mayores diferencias de módulo E entre las distintas clases de hormigón que en el hormigón normal.

3.6.3 Retracción y expansión

La retracción y la expansión de un hormigón tienen por causa los cambios de volumen de la masa de cemento, debidos principalmente a variaciones en el contenido de agua.

Los áridos, por regla general, no influyen directamente en estas deformaciones. Pero, debido a su rigidez, actúan oponiéndose a ellas. Como los áridos livianos poseen un módulo de elasticidad pequeño, ofrecen menor resistencia a la contracción y a la expansión que los áridos normales. Es por ello que debe contarse con más deformaciones en los hormigones livianos.

En comparación con los hormigones normales de igual resistencia los hormigones livianos presentan un mayor contenido de cemento, puesto que sus áridos requieren una resistencia del mortero mayor que la del hormigón.

Además, el aumento del contenido de cemento eleva las deformaciones dependientes del tiempo.

La poca resistencia a la retracción causada por los granos de los áridos livianos y elevado contenido de cemento debido a la mejor calidad de la pasta de cemento, se ven ampliamente compensadas.

Los áridos livianos de poro abierto y forma caprichosa, con composición granulométrica poco adecuada, exigen, por el contrario, una cantidad desproporcionadamente grande de pasta de cemento para poder trabajar convenientemente con el hormigón. Los hormigones livianos fabricados con ellos presentan a menudo retracciones considerablemente mayores que los correspondientes hormigones normales.

El proceso de retracción de un hormigón liviano a lo largo del tiempo depende en gran medida de la porosidad de los áridos y de su absorción de agua. Sólo una parte de la humedad absorbida por los granos al fabricar el hormigón se cede de nuevo directamente a la atmósfera durante los procesos de fraguado y secado. Una parte considerable del agua de los poros de los granos pasa, según las condiciones de almacenaje, primero a la masa de cemento, y queda allí fijada física o químicamente.

Este desplazamiento interno de humedad puede retardar notablemente la retracción. Incluso puede dar lugar a una expansión del hormigón, durante un período prolongado cuando se trata de piezas de gran sección o cuando se dificulta la cesión de agua al exterior mediante recubrimientos impermeables.

Puede decirse que los hormigones livianos con estructura cerrada generalmente se retraen menos, cuando son jóvenes, que los normales de categoría similar.

Pero al cabo del tiempo las retracciones del hormigón liviano llegan a alcanzar a las del normal llegando algunas veces a sobrepasarlas. El tiempo de desecado dura más, en total, en los hormigones livianos. El valor final de la retracción con secado completo en recintos interiores secos, según la composición del hormigón y la clase de los áridos, se encuentra entre 0,3 y 1,0 mm/m .

3.6.4 Fluencia

Con la denominación de fluencia se designan los acortamientos del hormigón, después de su puesta en obra, que una carga permanente produce en el transcurso del tiempo y que se adicionan a las deformaciones iniciales y a las retracciones y expansiones.

La fluencia del hormigón, igual que su retracción, se deben a un determinado comportamiento de la masa de cemento. Están relacionadas estrechamente, con el comportamiento del agua físicamente unida a la masa de cemento.

Los áridos más utilizados en el hormigón liviano, es decir, la arcilla y la pizarra expandidas, no sufren ellos mismos, prácticamente, deformación por fluencia. Ofrecen por lo tanto resistencia, como los áridos del hormigón normal, a la fluencia de la masa de cemento. Esta resistencia es tanto mayor cuanto más rígidos son los granos.

Los áridos livianos poseen generalmente un módulo de elasticidad más pequeño que los áridos normales. Por lo tanto, en condiciones iguales debe contarse en el hormigón liviano con una mayor deformación por fluencia que en el hormigón normal con igual contenido de cemento e igual calidad de la masa de cemento.

A esta influencia se opone, en la mayoría de los hormigones livianos, una relación agua - cemento menor. La menor porosidad de la masa de cemento, así ocasionada, disminuye las deformaciones dependientes del tiempo.

La fluencia del hormigón es en muchos casos una propiedad favorable. Reduce tensiones internas debidas a deformaciones por temperatura o retracción, o por asientos diferenciales de apoyos, disminuyendo así el peligro de fisuración.

Sin embargo, la fluencia a menudo tiene efectos negativos, ya que aumenta las deformaciones. Por ejemplo, las deformaciones por flexión en las estructuras de grandes luces crecen de tal forma con el tiempo, que dan lugar a grietas en las piezas, o crean dificultades para su utilización.

En piezas pretensadas la fluencia da origen a una pérdida de fuerza de pretensado, lo que obliga a un aumento de las secciones transversales del hormigón del acero.

3.6.5 Adherencia entre armadura y hormigón

La calidad de la adherencia entre la armadura y el hormigón es un factor básico para el anclaje de los hierros de armadura, pretensados o no. Además influye en gran medida sobre la distancia y amplitud de las grietas que aparecen cuando se sobrepasa la resistencia a la tracción del hormigón.

El efecto de adherencia viene determinado principalmente por el acabado superficial del acero (rugosidad, nervaduras) y por la resistencia del hormigón. También ejercen influencia la calidad de la masa de cemento o del mortero y el tipo de árido.

La obtención de la resistencia de adherencia ofrece dificultades por el hecho de que la disposición de los ensayos influye notablemente sobre el resultado. Por este motivo sólo pueden compararse entre sí valores obtenidos bajo idénticas condiciones de ensayo.

Otra dificultad consiste en la definición de que se entiende por esfuerzo crítico de adherencia. Puede designarse con este nombre la tensión de adherencia máxima alcanzable, correspondiente a la fuerza de arrancamiento de la armadura, sin tener en cuenta el desplazamiento relativo entre el acero y el hormigón.

Otra posibilidad es la de fijar un deslizamiento todavía admisible desde el punto de vista de la formación de grietas en el hormigón y definiendo la tensión de adherencia correspondiente como el esfuerzo de adherencia crítico.

La magnitud de las tensiones de adherencia admisibles queda determinada entonces casi exclusivamente, en lo que depende del acero, por la disposición de la superficie de las barras de la armadura.

Una afirmación sobre la colaboración del hormigón con el acero, según el tipo de acero utilizado, es posible solamente mediante ensayos especiales. Se trata de los denominados ensayos de arrancamiento. Las condiciones en que se verifican los ensayos sólo corresponden en forma muy limitada a las condiciones en que se encuentran verdaderamente los elementos de construcción.

Puesto que no pueden abarcarse simultáneamente todos los parámetros importantes, los resultados de estos ensayos de arrancamiento no pueden llevarse directamente a la práctica, pero permiten una comparación con los materiales y tipos de construcción ya experimentados. En el caso del hormigón liviano armado es decisiva la comparación con el hormigón armado normal.

Según el tipo de árido empleado el comportamiento respecto a la adherencia entre el hormigón liviano y la armadura puede ser mejor o peor que en los hormigones normales de igual resistencia. La valoración de los resultados de los ensayos de que se dispone ha mostrado, sin embargo, que en el hormigón liviano, salvo excepciones, las condiciones no son excesivamente peores. Por lo general la adherencia de las barras de la armadura, en el hormigón liviano es similar a la del hormigón normal.

Las tensiones de adherencia son tanto mayores cuanto mayor es la resistencia del mortero respecto a la del hormigón. Las mezclas de hormigón liviano con consistencia demasiado blanda no son desde luego adecuadas para construcciones de hormigón armado, debido al gran deslizamiento que pueden sufrir los aceros.

3.6.6 Absorción de agua e impermeabilidad

Los hormigones livianos contienen más poros que el normal, debido a que sus áridos son más porosos. En consecuencia, absorben más humedad que este último al quedar depositados bajo agua.

La absorción de agua, hasta llegar a la saturación total, oscila en los hormigones livianos, entre el 12 y el 22 % en volumen, mientras que en un hormigón normal de dosificación correcta y bien compactado este valor es de un 12 % en volumen.

A pesar de su gran capacidad de absorción de agua, los hormigones livianos no se comportan peor que los normales en lo referente a su impermeabilidad. La resistencia de un hormigón a que penetre el agua depende principalmente de la calidad del mortero y menos de la porosidad y estanqueidad de los áridos.

La relación agua - cemento en los hormigones livianos es, normalmente, menor que en el hormigón normal de igual resistencia. Esto significa que la pasta de cemento, y con ello por lo general también el mortero, contienen menos poros capilares y por tanto son más impermeables. Así queda compensada la influencia de por sí desfavorable de los porosos áridos livianos sobre la permeabilidad.

En todos los ensayos dados a conocer, de hormigones livianos con estructura cerrada, se obtuvo una penetración de agua similar o en parte aún menor que en el hormigón normal de igual resistencia.

3.6.7 Resistencia a la congelación y deshielo

Si se utiliza hormigón liviano para hacer piezas de construcción que deban resistir las inclemencias meteorológicas, como por ejemplo tapas de alcantarillado, cordones cunetas, puentes para peatones, industriales o para el tráfico, es necesario que posea una determinada resistencia a la congelación y deshielo.

Esta resistencia depende de las propiedades de la pasta de cemento, de los áridos y de la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos. Las condiciones requeridas por la pasta de

cemento o mortero (relación agua-cemento, contenido de oclusiones de aire artificiales) se conocen para el hormigón normal y se deben también cumplir para el hormigón liviano.

No existe hasta hoy un procedimiento de ensayo que permita predecir la resistencia a la congelación y descongelación y a la acción de la sal de deshielo de un hormigón, basándose en el examen de los áridos.

Los ensayos que permiten establecer afirmaciones seguras sobre el hormigón son largos y caros. Pero minuciosos exámenes han mostrado claramente que las oclusiones de aire introducidas artificialmente originan una buena resistencia a los fenómenos antes mencionados, tanto en el hormigón ligero como en el normal, siempre y cuando los propios áridos tengan una resistencia suficiente a dichos fenómenos, incluso bajo las condiciones de borde que existan en el hormigón.

Por ello es siempre de aconsejar el prever incluso los hormigones ligeros con una cantidad suficiente de oclusiones de aire artificiales cuando las superficies del hormigón estén expuestas a duras condiciones meteorológicas y a la acción de sales de deshielo.

El efecto favorable de los poros de los granos, puede perderse en gran medida cuando los áridos se mojan intensamente antes de su empleo y después de él, con lo que los hormigones fabricados con ellos no pueden secarse suficientemente antes de sufrir los efectos de congelación y descongelación.

El tiempo necesario para el secado de hormigones ligeros fabricados con áridos mojados es notablemente mayor que para el hormigón normal. Aun en tales casos, las oclusiones de aire artificiales producen una mejora.

En aquellos hormigones ligeros que no pueden secarse totalmente antes de sufrir las inclemencias meteorológicas y en los que es de especial importancia que tengan una buena resistencia a la congelación y a la sal de deshielo, deberían emplearse los áridos en el estado más seco posible.

Si no es posible la introducción artificial de oclusiones de aire a causa, por ejemplo, de la resistencia a la compresión del hormigón exigida, puede mejorarse la resistencia a las heladas mediante un tratamiento de la superficie, por ejemplo disponer de una capa de conservación de resina epoxi.

De esta forma no es de esperar que se dañe la estructura del hormigón en el interior de los elementos de construcción así tratados, por la acción de las heladas.

3.6.8 Resistencia al desgaste

La resistencia de un hormigón contra el desgaste mecánico (efectos de fricción, de rodadura, etc.) depende principalmente de las siguientes propiedades:

Resistencia y dureza de la pasta de cemento o del mortero fino.

Resistencia y dureza de los áridos.

Calidad de la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos.

Al iniciarse una acción de desgaste, el estado de la superficie (lisa o rugosa) ejerce su efecto sobre la abrasión. Una superficie pulida ofrece inicialmente menos puntos de ataque para su deterioro.

La resistencia contra este tipo de acción es menor en el hormigón liviano que en el normal, debido a la poca resistencia de los áridos livianos.

En las pruebas por fricción se obtuvo en el hormigón liviano un desgaste entre dos y cinco veces mayor. La sustitución de los áridos livianos finos por arena natural solamente en un caso elevó la resistencia al desgaste de forma ostensible.

No se manifestó una influencia significativa de la clase de árido liviano sobre el comportamiento frente al desgaste.

Mientras en las pruebas al desgaste por fricción no se notó gran diferencia entre la cara superior y la inferior del hormigonado, en las pruebas a la rodadura las pérdidas en la cara inferior fueron, en su mayoría, considerablemente menores.

Esto se debe, más que a la mejor calidad del hormigón, a que las bolas utilizadas en el ensayo no encuentran ningún punto de ataque en la lisa superficie de la cara inferior. En la cara superior del hormigonado, que es la interesante en las condiciones de trabajo prácticas, las pérdidas por abrasión en los hormigones livianos resultaron entre una vez y media y cinco veces mayores que las del hormigón normal.

No se observa u dependencia sistemática entre el desgaste y la densidad aparente del hormigón. La pérdida por abrasión disminuye al aumentar la resistencia a la compresión del hormigón, en ambos tipos de ensayos.

De los resultados de los ensayos al desgaste se desprenden las conclusiones siguientes: la resistencia al desgaste de los hormigones livianos es notablemente menor que la del hormigón normal. A pesar de ello, es suficiente para gran número de casos

3.6.9 Coeficiente de dilatación térmica

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón depende principalmente de los coeficientes de dilatación térmica, de los módulos de elasticidad y de las proporciones en volumen de los áridos y de la pasta de cemento, así como del contenido de humedad y de la temperatura del hormigón.

Para un cálculo estimativo del coeficiente de dilatación del hormigón liviano con estructura cerrada, puede utilizarse el modelo representado en la figura 3.6-2. Considera el hormigón liviano como un sistema en el que los dos componentes, el árido y la pasta de cemento, se deforman igualmente debido a la íntima unión que existe entre ellos.

La magnitud de esta deformación y la distribución de tensiones internas queda determinada por la rigidez a la dilatación de los componentes, que ocupan un espacio determinado. De la necesaria compatibilidad de deformaciones se obtiene el coeficiente de dilatación térmica del hormigón

$$\alpha_{Tb} = \frac{\alpha_{Tk} \cdot E_k \cdot V_k + \alpha_{Tz} \cdot E_z \cdot V_z}{E_k \cdot V_k + E_z \cdot V_z}$$

donde α_T = Coeficiente de dilatación térmica

E = Módulo de elasticidad

V = Parte ocupada por cada componente, en volumen

Subíndices: b = hormigón

k = árido

z = pasta de cemento

Si el hormigón contiene otros componentes, por ejemplo arena natural, la expresión será entonces:

$$\alpha_{Tb} = \frac{\sum \alpha_{Ti} \cdot E_i \cdot V_i}{\sum E_i \cdot V_i}$$

Estas relaciones presuponen una total solidaridad de las dilataciones térmicas de cada uno de los componentes. Los valores calculados con ellas representan por ello el límite inferior de los coeficientes de dilatación térmica que cabe esperar. El límite superior se obtiene partiendo del razonamiento de que la dilatación térmica de un material mixto no puede ser mayor que la suma de las dilataciones térmicas de sus componentes, en caso de que actuasen sin coerciones recíprocas:

$$\alpha_T = \frac{\sum \alpha_{Ti} \cdot V_i}{\sum V_i}$$

La dilatación térmica de los hormigones secos y la de los hormigones que han estado largo tiempo bajo agua son mínimas y aproximadamente son iguales entre sí.

En los hormigones livianos con estructura cerrada, las diferencias del coeficiente de dilatación con respecto al valor de cálculo $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6} / \text{grd}$ no son mayores que en los distintos hormigones normales.

Generalmente el coeficiente de dilatación α_{Tb} es algo menor. Vale, como promedio, $8 \cdot 10^{-6} / \text{grd}$.

3.6.10 Conductibilidad térmica

La conductibilidad térmica de un material de construcción poroso depende principalmente de su densidad aparente y de su contenido de humedad. Al mismo tiempo, influye también el tamaño y la distribución de los poros, la composición química de los componentes sólidos, la estructura (cristalina o amorfa) y la temperatura.

Cuando la saturación de agua es sólo parcial, la transmisión del calor en los poros es un proceso complejo. Hay que diferenciar entre poros llenos de agua (con el correspondiente pequeño diámetro), poros con paredes mojadas y poros secos. En los poros con paredes mojadas el transporte de calor se realiza a través del agua que se transforma en vapor en la parte caliente de la pared y se condensa en la parte opuesta, que está fría (difusión por el vapor). La transmisión del

calor por difusión por el vapor depende mucho de la temperatura, contrariamente a lo que ocurre con los otros tipos de transmisión. Aumenta con la temperatura. A la presión atmosférica y con una temperatura de aproximadamente 60°C, los poros con paredes mojadas transmiten ya tanto calor como los poros totalmente llenos de agua. A esta temperatura, el coeficiente de conductibilidad no aumenta al aumentar la cantidad de agua contenida en los poros.

A temperaturas más elevadas, los poros con paredes mojadas conducen el calor mejor que los poros llenos de agua. Bajo determinadas condiciones, puede aun llegar a disminuir al aumentar la cantidad de humedad.

El proceso de difusión por el vapor es decididamente la causa de que no sea lineal la relación entre el grado de saturación y el coeficiente de conductibilidad térmica y de que el coeficiente de conductibilidad dependa de la temperatura.

El coeficiente de conductibilidad del calor aumenta, al crecer el contenido de humedad o bien al aumentar la saturación del conjunto de los poros. En el hormigón normal el coeficiente de conductibilidad de una muestra seca crece, hasta que se satura totalmente de agua, de 1,60 a 2,30 kcal/m.h.grd. El aumento es, en promedio, de 0,05 kcal/m.h.grd al aumentar la humedad en un 1 % en volumen; es decir, vale aproximadamente un 3 %.

El coeficiente de conductibilidad de los hormigones ligeros depende en menor grado de la humedad. Por término medio aumenta de unas 0,5 a unas 0,95 kcal/m.h.grd. Esto significa un aumento de 0,01 kcal/m.h.grd por cada 1 % en volumen de aumento de la humedad, es decir, alrededor de un 2 %.

3.6.11 Resistencia contra incendios

La influencia de las temperaturas elevadas sobre las cualidades del hormigón interesa en el momento de determinar la capacidad de carga de las estructuras que pudieran estar expuestas a la acción del fuego, y cuando se emplea hormigón para estructuras que, de acuerdo con su finalidad, están expuestas continua o alternativamente a temperaturas elevadas.

El hormigón no es combustible. A pesar de ello, puede ser afectada por el fuego la capacidad sustentante de los elementos de hormigón en masa, de hormigón armado y de hormigón pretensado.

Por una parte la resistencia del hormigón disminuye por la acción de las temperaturas elevadas. Sin embargo, es más grave una posible reducción de la resistencia como consecuencia de un calentamiento inadmisiblemente fuerte de la armadura. Este calentamiento es, tanto menor, cuanto mayor es la resistencia al paso del calor del recubrimiento de hormigón. Pero de pronto aumenta cuando, debido a la acción simultánea de las tensiones térmica y de carga, se producen grietas y desprendimientos en el hormigón. Con ello puede ir también aparejado una disminución de las secciones resistentes de hormigón y del efecto de adherencia entre el hormigón y la armadura.

Las cualidades del hormigón que influyen sobre la duración de la resistencia contra incendios de un elemento de construcción son más favorables en los hormigones livianos con estructura cerrada que en el hormigón normal.

La resistencia a la transmisión del calor es mayor en los hormigones livianos. Esto tiene por consecuencia, con igual sollicitación al fuego, una menor elevación de la temperatura en el interior de los elementos estructurales.

En combinación con un coeficiente de dilatación térmico algo más bajo α_T , y un módulo de elasticidad E_{lb} sensiblemente menor conduce esto a tensiones térmicas menores. Ya con ello se evita el peligro de la formación de grietas y desprendimientos.

La disminución de la resistencia como consecuencia de la acción de la temperatura es menor en el hormigón liviano de áridos expandidos que en hormigones con algunos áridos normales, especialmente aquellos con componentes de cuarzo.

El cuarzo varía su estructura cristalina a unos 600°C y experimenta con ello un fuerte aumento de volumen. Los hormigones con áridos que contienen cuarzo tienen tendencia por ello, a altas temperaturas, a que se formen en ellos grietas y desprendimientos. Con ello puede producirse la pérdida de todo el recubrimiento de la armadura. También a través de las grietas el calor puede penetrar de forma más rápida hacia la armadura que con un recubrimiento sin dañar.

Frente a ello, el hormigón liviano permanece, con temperaturas más elevadas, por lo general más libre de grietas y desprendimientos. Esta clase de daños solamente se observaron hasta ahora cuando los hormigones livianos bastante humedecidos estuviesen expuestos a las llamas. En estos casos fueron lanzados algunas veces granos de áridos de la estructura del hormigón, como si fueran proyectiles.

Un desprendimiento continuo condujo finalmente al derrumbamiento del elemento de construcción sollicitado por una fuerza de compresión exterior. Este comportamiento es seguramente debido al agua contenida en los poros de los áridos que se evapora a temperaturas elevadas,

creándose por ello presiones altas, cuando la formación de vapor en la unidad de tiempo es mayor que la posible evacuación del vapor al exterior. Debido a la pequeña cantidad de agua evaporable no existe este peligro evidentemente en el hormigón normal.

Aparte de este caso especial, no se teme en estructuras suficientemente desecadas, se conserva durante más tiempo el ya en sí mejor aislamiento térmico que ofrece el hormigón liviano.

En ensayos al fuego realizados en vigas en I de hormigón pretensado con unos 6 m de luz, una altura de 50 cm, alas de 30 cm de ancho y un recubrimiento de hormigón de la armadura en la cara inferior de la viga de 5 cm, las vigas fabricadas con hormigón de arcilla expandida soportaron la acción del fuego durante un período un 30 % más prolongado que las vigas de hormigón normal.

En éstas se produjo la rotura, casi siempre, por fallo de la armadura, mientras que el hormigón liviano protegió al principio el acero contra las temperaturas elevadas, consiguiendo con ello, una larga duración de la resistencia, de 2 horas y más.

En total es de esperar, por las causas mencionadas, en los elementos estructurales de hormigón liviano, por lo general, una mayor duración de la resistencia contra incendios que en los de hormigón normal.

3.6.12 Protección acústica

El aislamiento contra los ruidos aéreos de los elementos de construcción bidimensionales compactos y homogéneos (paredes, losas) depende en primer lugar de su peso por unidad de superficie, pero también de la rigidez a la flexión, de la naturaleza de su superficie y de la estructura interior.

Para conseguir igual aislamiento acústico el espesor de una pared de hormigón liviano debería ser mayor que el de una pared de hormigón normal, proporcionalmente a las densidades respectivas.

Ensayos franceses y holandeses han demostrado, sin embargo, que los hormigones livianos de áridos expandidos se comportan de forma más favorable de lo que era de esperar según el peso por unidad de superficie.

Así, por ejemplo, respecto al aislamiento contra los ruidos aéreos, una pared de 20 cm. de espesor, sin revoque, de hormigón de arcilla expandida, fue equivalente a una pared de idéntico espesor de hormigón normal, y a una pared de 33 cm de espesor de ladrillo macizo. La causa de ello posiblemente sea la estructura de los áridos expandidos con múltiples poros embebidos en ella.

3.6.13 Protección contra la corrosión de la armadura

La corrosión como proceso electroquímico supone que entre las distintas zonas de la superficie del acero existe una diferencia de potencial eléctrico, que las materias que lo rodean poseen conductibilidad eléctrica y que puede penetrar el oxígeno del aire.

Estas hipótesis se cumplen en el hormigón armado y en el hormigón pretensado. Las diferencias de potencial se producen, entre otros motivos, por desigualdades en la estructura y en la superficie de las armaduras.

El hormigón se comporta, debido a su humedad propia, como electrolito y posibilita, a causa de su inevitable porosidad, la penetración de oxígeno.

La experiencia ha enseñado que el hormigón compacto, a partir de un determinado espesor, protege suficientemente la armadura contra la corrosión en las condiciones normales que se cumplen generalmente. Este efecto de protección se basa en el carácter alcalino del hormigón.

En soluciones alcalinas con valores del pH entre 9 y 13 el acero no sufre corrosión. Debido a que las soluciones acuosas de los productos hidratantes del cemento reaccionan de forma alcalina, llegando a dar al pH del hormigón un valor aproximadamente de 12,5, se pasiva el acero en el hormigón. Se supone que sobre la superficie del acero se forma una película de protección, insoluble y sin discontinuidades, de óxido de hierro o hidróxido de hierro. La pasivación y con ello la protección a la oxidación cesan cuando el valor del pH del hormigón disminuye o la película de protección es localmente destruida, por ejemplo, por cloruros.

Una disminución del valor del pH puede producirse por penetración en el hormigón de ácidos o sales o por carbonatación del hormigón. Especial importancia corresponde a la posibilidad mencionada en último lugar, ya que la carbonatación se produce, en la superficie del hormigón, incluso bajo condiciones normales de conservación, penetrando más o menos profundamente en su interior.

El aire con contenido de dióxido de carbono, que a causa de la porosidad del hormigón penetra en todas partes, pero preferentemente por los puntos de fallos y fisuras, ocasiona una transformación del hidróxido de calcio en carbonato cálcico neutro y con ello una disminución del valor del pH.

Para mantener la protección contra la corrosión de la armadura el espesor del recubrimiento de la armadura tiene que estar calculado de tal forma que la profundidad de carbonatación no alcance la superficie del acero durante toda la existencia de la obra. Determinante para ello, junto al espesor del recubrimiento, es la compacidad y la homogeneidad del hormigón. Su efecto protector depende de forma decisiva de la composición, especialmente de la relación agua-cemento, de la consistencia y de una consolidación impecable.

En comparación con el hormigón normal, el hormigón liviano con estructura cerrada se encuentra respecto a la protección contra la oxidación de la armadura en condiciones en parte más favorables, pero también en parte más desfavorables.

La relación agua - cemento, por lo general más baja en el hormigón liviano a igual tipo de calidad, influye favorablemente la protección contra la oxidación. La pasta de cemento contiene menos poros y por ello es más compacta que en el hormigón normal de igual resistencia. Por tanto, la carbonatación en la pasta de cemento avanza aquí más lentamente.

Pero desgraciadamente también se ha demostrado que la mayoría de los áridos livianos oponen una resistencia relativamente pequeña a la difusión de los gases. Facilitan por ello la penetración de anhídrido carbónico al interior del hormigón. Al tocar la armadura un grano de árido hasta el que ya ha penetrado la carbonatación, provoca en esta zona un mayor peligro de corrosión.

Las instrucciones provisionales para el hormigón liviano armado tienen esto en cuenta al ordenar que el recubrimiento de la armadura en los hormigones livianos con áridos porosos debe ser mayor en determinados casos.

Con un tamaño máximo de grano de hasta 16 mm de diámetro se exige, por lo general, que el recubrimiento sea de aproximadamente 0,5 cm mayor que el diámetro máximo del grano. Esto debe evitar que un grano de árido en contacto con la armadura y que llega hasta la superficie del hormigón actúe como puente de difusión.

Debido a que los huecos dejados por los áridos reducen también, aun con suficiente recubrimiento, el efecto protector, hay que prestar especial atención a un impecable compactación del hormigón. Esto presupone mezclas bien elaboradas con suficiente cantidad de mortero.

El encofrado debe ser lo más estanco posible, para evitar el escape de mortero fino y, como consecuencia de ello, la formación de oquedades. Los vibradores de encofrados, empleados además de los vibradores interiores favorecen la formación de superficies de hormigón cerradas y compactas.

Si se cumplen las condiciones antes mencionadas, la armadura en el hormigón liviano con estructura cerrada queda también prácticamente protegida contra la corrosión, tanto como en el hormigón normal.