



HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND



INTRODUCCION

El hormigón de cemento portland, que se designa abreviadamente como “H°”, es uno de los materiales de mayor uso en ingeniería civil. Junto con el acero constituye otro material de relevantes propiedades: el hormigón armado cuya designación abreviada es “H° A°”.

El H° se prepara mezclando un aglomerante (cemento portland), agregados inertes y agua. Esta mezcla se amasa hasta formar una pasta de consistencia viscosa que recibe el nombre de “H° fresco” que un molde y de “H° frehuevo o encofrado el cual le confiere la forma. El cemento portland reacciona químicamente con el agua dando lugar a una rigidización conocida como fraguado. El proceso continúa hasta que la mezcla alcanza una rigidez y resistencia similar a una roca natural. Este estado recibe el nombre de “H° endurecido”.

El aglomerante empleado es alguno de los tipos de cemento portland conocidos, siendo el cemento portland normal el de uso más común hasta fines del siglo pasado. En el presente, la necesidad de economizar combustibles ha dado paso a los cementos portland tipo mezclas, en los cuales, el cemento portland tradicional, se mezcla en la misma fábrica con otros materiales provenientes de los residuos de ciertas industrias como ser, escorias, cenizas volantes, calcáreos, etc.

Otros de los materiales componentes del H° son los áridos. Se utilizan áridos pétreos gruesos y finos (granza y arena). En la actualidad también se emplean aditivos químicos con el objeto de comunicar algunas propiedades especiales a las mezclas.

Por lo dicho hasta aquí se aprecia que la preparación del H° es una operación muy sencilla. En efecto: la mayoría de los operarios de las obras preparan H° de la manera comentada. Sin embargo, cuando se trata de obtener ciertas cualidades del material, tanto en estado fresco como endurecido, es necesario aplicar conocimientos tecnológicos adecuados a fin de lograr el cometido. Ni hablar cuando además es necesario ofrecer al comitente, garantías sobre la calidad y seguridad del producto final, es decir de la estructura de H° A° terminada.

El H° es un material de dominio del ingeniero civil. Es el ingeniero quien debe preparar la “receta” indicando cuales son los materiales componentes que se deben emplear; en que proporciones deben mezclarse y como debe realizarse el colado y el tratamiento ulterior del material.

El presente capítulo tiene intención transmitir al estudiante los conocimientos básicos sobre la tecnología del H° en sus distintos aspectos como así también una visión de conjunto de todas las variables y factores que intervienen en la cuestión, de manera tal, pueda resolver sin dificultad los aspectos sencillos que se le presenten en la práctica profesional y además, sea consciente de que los problemas complicados requieren de un estudio técnico más exhaustivo.

Ing. Civil Ricardo R. Rissi



1º. CONCEPTO DE HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND

El hormigón de cemento portland es, básicamente, un material compuesto por una mezcla de cemento portland, agregados pétreos (grueso y fino) y agua. La mezcla, inicialmente de consistencia pastosa, se rigidiza paulatinamente hasta alcanzar un grado de dureza similar al de una piedra natural, debido a la reacción química que se produce entre el cemento portland y el agua de amasado. Por sus propiedades finales, a veces se designa el Hº como “una piedra artificial”.

Modernamente otros materiales se han incorporado al listado de los materiales componentes elementales mencionados. Estos son: aditivos químicos; adiciones minerales pulverulentos; fibras de acero o de polipropileno; etc. En general los aditivos químicos han pasado a ser componentes casi rutinarios debido a las múltiples propiedades que permiten conferir a las mezclas, v.g.: reducción de la cantidad de agua de amasado; mayor resistencia mecánica; retardo de la iniciación del fraguado; etc. En cambio, la incorporación de adiciones minerales, fibras, etc., se realiza en casos más particulares.

El Hº es entonces un material compuesto por otros materiales. Estos materiales que participan en la mezcla se designan con el nombre genérico de “materiales componentes”. La mezcla resultante, es decir el Hº, es otro material, cuyas propiedades son distintas a las de los materiales componentes, aunque de alguna u otra forma están relacionadas con las propiedades de los mismos.

Del Hº común se esperan siempre dos cualidades: una adecuada resistencia mecánica a la compresión y un buen comportamiento general durante su vida útil. Ambas cualidades deben predeterminarse conforme con las solicitaciones a las que estará sometida la estructura y a las condiciones de servicio a las que estará expuesto.

El ingeniero debe intervenir para lograr el cumplimiento de las cualidades mencionadas de acuerdo con las exigencias del caso, sin perder de vista un importante aspecto: la economía de la obra.

El Hº es un material relativamente económico comparado con otros materiales estructurales. Tiene además, una serie de ventajas entre las que mencionaremos las siguientes: **se puede moldear**: es decir, luego de preparado, cuando aún se encuentra en estado pastoso (fresco), es posible transportarlo y colarlo dentro de un molde o encofrado. Su grado de consistencia es tal que con poco trabajo es posible compactarlo y hacer que ocupe todos los lugares del molde. Cuando rigidiza, adopta las más variadas formas conferidas a través del molde.

Adquiere resistencia mecánica: en efecto: la combinación química del cemento portland con el agua produce una rigidización inicial con crecimiento paulatino de la resistencia mecánica hasta alcanzar un máximo a los veintiocho días aproximadamente. La resistencia a la compresión que alcanza es importante pudiendo llegar a 120 Mpa, siendo los valores corrientes del orden de 25 Mpa. El valor de la resistencia no es casual. Es necesario diseñar la mezcla para que efectivamente se logre el valor requerido. La resistencia del Hº hace posible que soporte importantes cargas de compresión.

Se combina perfectamente con el acero: en efecto: antes de hormigonar, es decir antes de realizar el colado en el encofrado, se disponen en el interior del mismo, barras de acero de



construcción de manera tal que el H° fresco las cubra perfectamente. Luego de endurecido se obtiene otro material distinto: **el hormigón armado (H° A°)**. Las barras de acero son capaces de absorber los esfuerzos de tracción que no puede tomar el H°. El H° A° es un excelente y tradicional material de construcción y su existencia es posible gracias a tres importantes condiciones: 1) Los coeficientes de dilatación térmica del acero y del H° son similares; b) El H° provee un medio alcalino que protege al acero de la corrosión; c) El H° se adhiere fuertemente al acero haciendo posible que ambos materiales trabajen solidariamente comportándose como un único material.

También posee el H° algunas desventajas con respecto a otros materiales. En este aspecto debemos mencionar las siguientes: **es fisurable**.

2°. CLASIFICACION GENERAL DEL HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND

A fin de realizar un estudio ordenado del material, conviene tener presente una clasificación de orden general aceptada en el ambiente de la construcción que a su vez nos ubica en el problema, llegado el momento de encarar una cierta y determinada cuestión técnica. Por otra parte no se debe perder de vista que los materiales componentes del H° siempre son los mencionados más arriba, aunque los materiales pueden ser distintos según los casos, como veremos.

2.1. CLASIFICACION SEGÚN LOS ESFUERZOS A LOS QUE ESTE SOMETIDO

Si el elemento estructural está sometido fundamentalmente a solicitaciones de compresión, entonces no necesita de armaduras. En este caso estamos en presencia de una estructura de **hormigón simple**. Entre las estructuras típicas de H° simple podemos citar: calzadas de calles urbanas, de autopistas, de aeropistas; pisos en general; etc.

Cuando los elementos estructurales están sometidos a todo tipo de solicitaciones (tracción, compresión flexión, etc.) es necesario disponer barras de acero en el interior de la masa del elemento en cuestión. Las barras de acero se ubican en los lugares en donde están presentes las solicitaciones de tracción a fines de que sean absorbidas por aquellas. Estamos en presencia del **hormigón armado**.

Para salvar luces importantes sin apoyos intermedios, empleando vigas esbeltas de hormigón armado se recurre a la técnica de comprimir las secciones de dichos elementos antes de que actúen las cargas exteriores. Por esta razón dicha técnica se denomina “precompresión”. La precompresión se realiza en las zonas que más tarde serán solicitadas a tracción por las cargas exteriores. La materialización se lleva a cabo tensando cables de acero o cordones de acero que reaccionan dentro del mismo elemento estructural, es decir se trata de una fuerza interna. Esta forma se denomina **hormigón pretensado**.

2.2. CLASIFICACION SEGÚN EL PESO ESPECIFICO DE LA MEZCLA

El hormigón normal tiene un peso específico o peso unitario luego de compactado del orden de 2400 Kg/m³. La heterogeneidad de los materiales componentes, como así también la variación de las proporciones en que c/u interviene en la mezcla, hace que el peso unitario fluctúe dentro de ciertos límites. Los reglamentos han establecido como **hormigón normal** aquel cuyo peso unitario está comprendido entre 2000 y 2800 Kg/m³. En la rutina de la



construcción, la densidad promedio del hormigón es de 2400 Kg/m^3 y este valor se adopta en los cálculos como peso propio del material.

Con el fin de alivianar las estructuras para hacerlas más económicas, más aislantes del calor y del ruido, etc., se han desarrollado hormigones especiales cuyos pesos específicos son mucho más bajos que los mencionados, pudiendo llegar a los 500 Kg/m^3 . Se trata de los ***hormigones livianos*** a los que el reglamento define como aquellas mezclas cuyo peso unitario es menor de 2000 Kg/m^3 .

Finalmente, la investigación consagró al hormigón de cemento portland como apto para absorber ciertos tipos de radiaciones, siempre y cuando su densidad fuese superior a un valor mínimo establecido. Así surgieron los ***hormigones pesados*** que el reglamento define como aquellos cuyo peso unitario es superior a 2800 Kg/m^3 . Para la materialización de escudos contra las radiaciones en las plantas nucleares, se emplean hormigones cuya densidad es mayor de 3800 Kg/m^3 .

2.3. CLASIFICACION SEGÚN EL TIPO DE INDUSTRIALIZACION

Tradicionalmente el hormigón fue preparado en la misma obra en el momento en que el encofrado estaba listo para recibir la mezcla. Esta manera de trabajo no tiene un nombre especial. Simplemente decimos que se trata de ***hormigón preparado en obra***. Es el ingeniero de obra el que tiene la responsabilidad, autoridad y conocimientos necesarios para dar instrucciones sobre los tipos y las proporciones de los materiales componentes a utilizar y de la manera de cómo realizar la mezcla.

Desde hace más de cincuenta años existen en nuestro país establecimientos industriales dedicados a preparar hormigón de cemento portland y comercializarlo en estado fresco. En otras palabras, el ingeniero de obra, prepara el encofrado, armaduras, etc. y luego compra el H°. El proveedor de H° se encarga de prepararlo en sus propias instalaciones y luego transportarlo en camiones especiales mezcladores a la obra y ponerlo a disposición de la misma para llenar los encofrados. Esta manera de producir y comercializar el H° se conoce con el nombre de ***hormigón elaborado***. En otros países de habla hispana se lo llama *hormigón premezclado*. Y en EE.UU, ready mixed concrete.

La necesidad de construir estructuras en breve tiempo, especialmente en el caso de naves industriales de grandes luces y altura, como así también la necesidad de simplificar los sistemas constructivos in situ, dio nacimiento a otro tipo de industrialización del H°: la prefabricación en taller. Consiste en fabricar bajo techo elementos estructurales primarios, tales como vigas, columnas, paneles de techo, paneles de cerramiento lateral, etc. y luego trasladar estos elementos mediante camiones, al predio en donde se construirá la obra. En el terreno, por lo general, únicamente se construyen las bases de las columnas, de tal manera que cuando lleguen las mismas, se inicia su montaje; luego se ensamblan las vigas; se apoyan los paneles de techo y finalmente se montan los paneles de cerramiento lateral. De esta manera se termina en breve tiempo la envolvente de la obra, quedando por hacer pisos, instalaciones, terminaciones, etc. Esta manera de producir elementos de hormigón armado y pretensado, recibe el nombre genérico de ***hormigón prefabricado***.



2.4.- CLASIFICACION SEGÚN SU ESTADO FISICO

Como ya se explicó, inicialmente luego de preparado, el H° tiene el aspecto de una masa viscosa que fluye y toma la forma del recipiente (encofrado) que lo contiene. Cuando está recién preparado y aún no ha sido colado, recibe el nombre de **hormigón fresco**. El H° fresco debe reunir una serie de características necesarias para lograr una estructura de calidad. Más adelante nos ocuparemos de este estado.

Una vez colado en el encofrado, compactado y terminado, el H° todavía permanece en estado fresco, pero ya tiene la forma que adoptará en definitiva y está densificado en grado suficiente. Este estado recibe el nombre de **hormigón in situ**. El H° in situ debe permanecer sin que se produzca en torno a él ningún tipo de trepidación que pueda dislocarlo, hasta tanto adquiera rigidez.

Finalmente, el proceso de hidratación del cemento portland que ha comenzado en el mismo momento en que toma contacto con el agua, comienza a acelerarse provocando primero una rigidización a las pocas horas después del colado, sin tomar resistencia. Luego a medida de que transcurren los días, el proceso químico de hidratación continua hasta alcanzar un 95% a los veintiocho días. Estamos en presencia del **hormigón endurecido**. Este es el estado en el cual permanecerá durante su vida útil. Por lo general se requiere que en este estado alcance una determinada resistencia mecánica y que también resulte inmune a las agresiones del medio ambiente. El 5% restante de la hidratación, tiene lugar en los próximos 360 días. Todo el incremento de resistencia que tiene lugar como consecuencia de la finalización de la hidratación, no se tiene en cuenta a los fines del cálculo. En cierta forma es una medida adicional de seguridad de la estructura.

2.5. CLASIFICACION SEGÚN EL METODO DE COMPACTACION EMPLEADO

Una vez colado el hormigón en el encofrado o en un molde, y mientras aún permanece en estado fresco, es necesario compactarlo para que el material alcance su máxima prestación. La compactación tiene por objeto eliminar el aire arrastrado u ocluido en la masa de tal manera se logre máxima compacidad, es decir mínimo espacios vacíos. Los métodos para compactar el H°, son pocos. El más efectivo es el vibrado mediante aparatos electromecánicos o neumáticos. Existen vibradores externos y vibradores internos. Los primeros se aplican en los moldes metálicos. La vibración que consiste en la aplicación de pulsos con frecuencias superiores a 3500 v.p.m.. se transmite al H° a través del molde. Los vibradores internos, en cambio, son equipos de forma de aguja que se introducen en la masa del H° fresco colado y transmiten pulsaciones superiores a las 10000 v.p.m.. En este caso, la vibración se aplica directamente en la masa del H°. Cualquiera sea la técnica de vibrado empleada, el H° recibe el nombre genérico de **hormigón vibrado**.

Otra manera de compactar el H° a la vez que se le confiere forma, es mediante centrifugación. Por lo general los elementos estructurales tienen forma cilíndrica, caso de caños; postes para soporte de líneas eléctricas, etc. Los moldes se apoyan sobre rodillos; una vez vertido el H° fresco, se echan a andar primero a pocas revoluciones, girando sobre el propio eje, para permitir la distribución uniforme del H° sobre toda la superficie del molde. Luego se incrementa la velocidad de giro hasta 200 a 300 v.p.m. VER. Por efecto de la fuerza centrífuga las partículas más pesadas de la mezcla (cemento portland y áridos) se aplastan contra la



superficie del molde y las más liviana (agua) migra hacia el eje del mismo. De esta manera se obtienen piezas de H° A° compactas, con superficies lisas. El sistema recibe el nombre de **hormigón centrifugado** y su uso tiene lugar en establecimientos de prefabricación.

Cuando en la obra no se dispone de vibradores para compactar el H°, se recurre al golpeteo del encofrado con masas y también a punzonar de forma manual el H° fresco con varillas de acero o de madera. En este caso se habla de **hormigón punzonado**. Como se comprenderá, esta es la manera más rudimentaria de compactar el H° fresco y plástico. Si la mezcla tiene poco agua y su consistencia es del tipo de tierra húmeda, el punzonado no es efectivo pues quedan huecos en la masa cada vez que se introduce la varilla de compactación. Entonces se emplean pisones, también aplicados manualmente. A este tipo de compactación se lo denomina **hormigón apisonado**.

Otra manera de compactar el H° semi seco de consistencia de tierra húmeda, es mediante rodillos vibratorios arrastrado con tractores. Esta es una técnica moderna que se aplica para construir carreteras y también diques. Recibe el nombre de **hormigón compactado con rodillos (H.C.R.)**.

2.6. CLASIFICACION SEGÚN CARACTERISTICAS ESPECIALES DE LA MEZCLA

En los últimos años del siglo pasado la aparición de nuevos materiales factibles de incorporar al H° durante su preparación, dio lugar a la obtención de mezclas con características especiales que fueron denominadas haciendo alusión a las propiedades obtenidas. De esta manera tenemos al **hormigón reforzado con fibras (H.R.F.)**, en donde se incorporan fibras de acero de 30 a 40 mm de largo por 0,3 a 0,4 mm de diámetro o también fibras de polipropileno de dimensiones análogas. Las fibras confieren ductilidad al H° que es de naturaleza frágil, aumentando su capacidad de deformación y de resistir a las sollicitaciones de flexión.

La aparición de los aditivos químicos superfluidificantes permitió la obtención de hormigones de muy alta resistencia, mayor de 50 MPa. Fue posible llegar hasta 120 MPa a los 28 días. Si se compara con las mejores resistencias logradas en la construcción de edificaciones importantes, esto es del orden de 35 a 38 MPa, se concluye que los **hormigones de alta resistencia (H.A.R.)** constituyen un hito.

El colado de elementos estructurales de grandes dimensiones, tales como bloques de los diques, bases de máquinas, etc., y los problemas de fisuración ocurridos debido a la aparición de tensiones de tracción de origen térmico, dio lugar al estudio de un nuevo tipo de mezcla denominado **hormigón masa**.

Otras características especificadas dan lugar a denominaciones análogas para el H°. Así tenemos el **hormigón impermeable**; el **hormigón resistente al desgaste**; **hormigón resistente a la agresión química**, etc., cuya significación es elocuente.



3. EL HORMIGON EN ESTADO FRESCO

3.1 CONCEPTO

Una vez mezclados los materiales componentes del Hº, estos son: áridos, cemento portland, agua y eventuales aditivos químicos, se obtiene una masa pastosa o viscosa denominada “hormigón fresco”. Esta masa o fluido viscoso debe reunir ciertas propiedades a efectos de su empleo. En primer lugar, debe permanecer en ese estado el tiempo suficiente y necesario para permitir ser transportado, luego colado y compactado hasta obtener su densificación y forma final. El componente químico activo es el cemento portland. En la última etapa de fabricación del mismo, se adiciona una pequeña cantidad de sulfato de calcio (yeso) que tiene por finalidad retrasar el fraguado del aluminato tricálcico que es el componente químico de mayor velocidad de hidratación. De esta manera, se dispone de un tiempo aceptable para preparar y colar el Hº, sin que se produzca su endurecimiento. El tiempo durante el cual permanece en estado fresco es del orden de seis a diez horas, dependiendo de la temperatura del mismo y de las condiciones climáticas exteriores. De todas maneras, los reglamentos son cautos y establecen un lapso de 1 ½ horas como máximo para transportar, colar, compactar y terminar el Hº normal sin aditivos retardadores del fraguado. En el caso de emplear dichos aditivos, se permite un mayor tiempo para las operaciones de hormigonado mencionadas.

Otra propiedad necesaria es la “trabajabilidad” de la mezcla que es la aptitud de la misma para ser colada sin dificultad y con el menor trabajo posible. Se requieren otras propiedades de la mezcla fresca que detallaremos luego. Por ahora decimos que es necesario acotar ciertas de características del Hº fresco a fin de obtener determinadas cualidades del hormigón endurecido.

3.2 CARACTERISTICAS DEL HORMIGON FRESCO

Entre las principales características del Hº fresco veremos las siguientes:

- ❖ Tiempo inicial de fraguado
- ❖ Trabajabilidad
- ❖ Segregación
- ❖ Exudación
- ❖ Densidad
- ❖ Variaciones volumétricas

3.2.1 Tiempo inicial de fraguado

El tiempo inicial de fraguado es el lapso que existe entre el momento de amasado del Hº y el momento en que comienza a rigidizarse. La duración del fraguado es el lapso que existe entre el momento en que comienza a rigidizarse y el momento en que alcanza cierto valor de resistencia mecánica que se mide a través de la fuerza que hay que aplicar a una aguja de determinada sección para que penetre 25 mm en la masa del Hº. El tiempo de fraguado es afectado por las condiciones climáticas. El frío retrasa el tiempo de fraguado; el calor lo acelera. En condiciones normales (entre 20 a 25°C de temperatura ambiente) el tiempo inicial de fraguado es del orden de cinco a seis horas y la duración del fraguado puede insumir dos a tres horas más. El empleo de aditivos químicos específicos tales como los aceleradores de fraguado o los retardadores de fraguado, modifican los tiempos originales. Dicha modificación depende del tipo y de la dosis del aditivo empleado. Se necesitan pequeñas dosis



de aditivo para retrasar significativamente el fraguado. En cambio, para acelerarlo, las dosis son mayores y crecen cuando se quiere acortar aún más el tiempo inicial del fragüe.

Para determinar tanto el tiempo inicial del fraguado como la duración del mismo, se realiza un ensayo de “Tiempo de Fraguado del H°” empleando la aguja de penetración Próctor. (Fig. N° 1). La aguja Próctor fue diseñada por su autor para el estudio de suelos. Otros investigadores determinaron su aplicación al H°. Para realizar el ensayo es necesario tamizar el H° por el tamiz N° 4 (IRAM 4,8 mm), es decir, se elimina el agregado grueso y se trabaja con el mortero cementicio resultante. La Norma IRAM describe el procedimiento del ensayo.

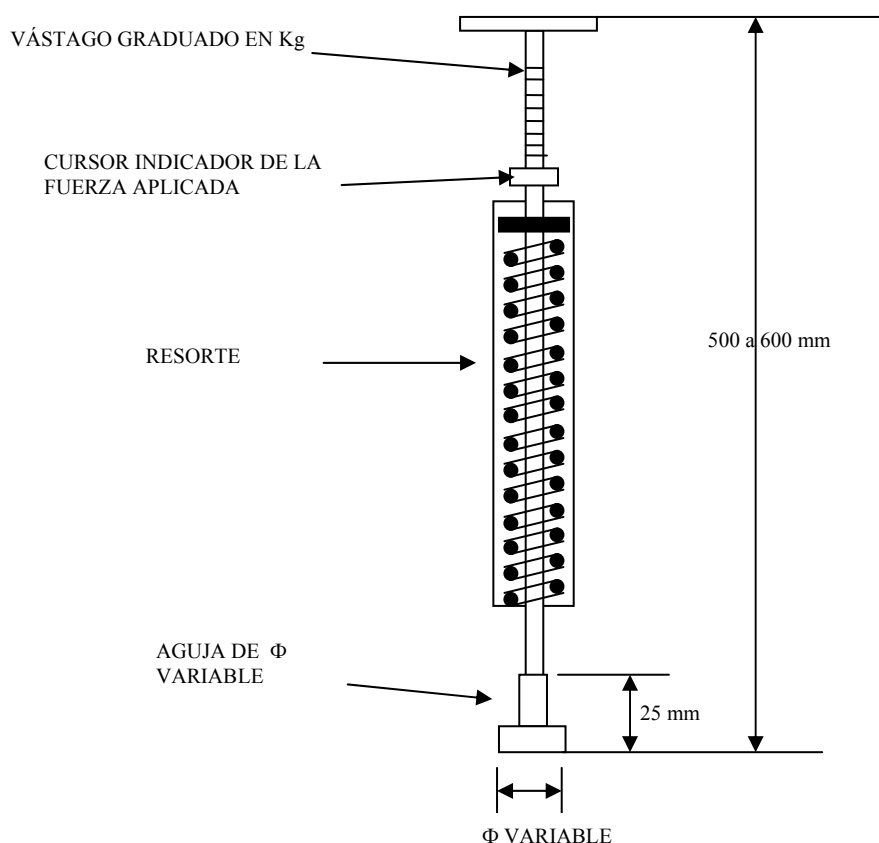


Fig. 1: Penetrómetro próctor para medir el tiempo de fraguado del hormigón

El mortero de trabajo es sometido cada tanto a prueba de penetración con la aguja Próctor. El operador apoya la aguja sobre la superficie del H° fresco tamizado y aplica una fuerza vertical hacia abajo, tratando de que la misma penetre 25 mm en la masa. La fuerza necesaria para tal cometido queda registrada en una escala existente en el vástago del aparato. Se divide la fuerza realizada por el área de la sección circular de la aguja. A medida de que el H° se rigidiza, se necesita mayor presión para hacer penetrar la aguja. Como la capacidad de carga del equipo es única, se recurre a cambiar la aguja, utilizando cada vez las de menor diámetro de manera que se incrementa la presión para la misma fuerza aplicada.

Es posible graficar los resultados en un diagrama “Penetración en Kg/cm² – Tiempo en horas”, tal como se muestra en la **Fig. N° 2**. Se define como “tiempo inicial de fraguado” al lapso transcurrido desde el momento de amasado del H° hasta el momento en que es necesaria una presión de 30 Kg/cm² para hacer penetrar la aguja Próctor, 25 mm en la masa del



mortero. El “tiempo final de fraguado” se mide a partir del mismo momento de amasado hasta que la presión alcanza 280 Kg/cm² para lograr la penetración de 25 mm. Ambos tiempos se determinan gráficamente a partir del trazado de la curva mencionada. Por los valores 30 y 280 del eje de ordenadas se trazan sendas paralelas al eje de abscisas hasta interceptar la curva. Desde estos puntos se bajan verticales hasta el eje de abscisas determinándose los tiempos descritos. La “duración del fraguado” es la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial de fraguado.

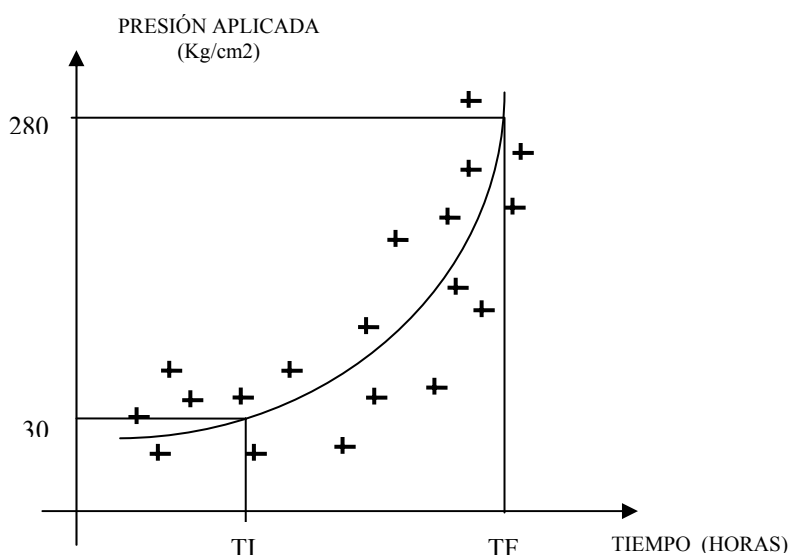


Fig. 2: Representación de los resultados del penetrómetro próctor; trazado de la gráfica compensadora y determinación de los tiempos inicial de fraguado (tif) y final de fraguado (tff) del hormigón

El ensayo permite comparar el comportamiento de un H° con aditivo respecto a otro sin aditivo. Se observa un desplazamiento de una gráfica respecto de la otra, **Fig. N° 3**. Sin embargo, es dudoso el traslado de los resultados de este ensayo realizado en el laboratorio sobre un H° tamizado a las condiciones reales de la obra.

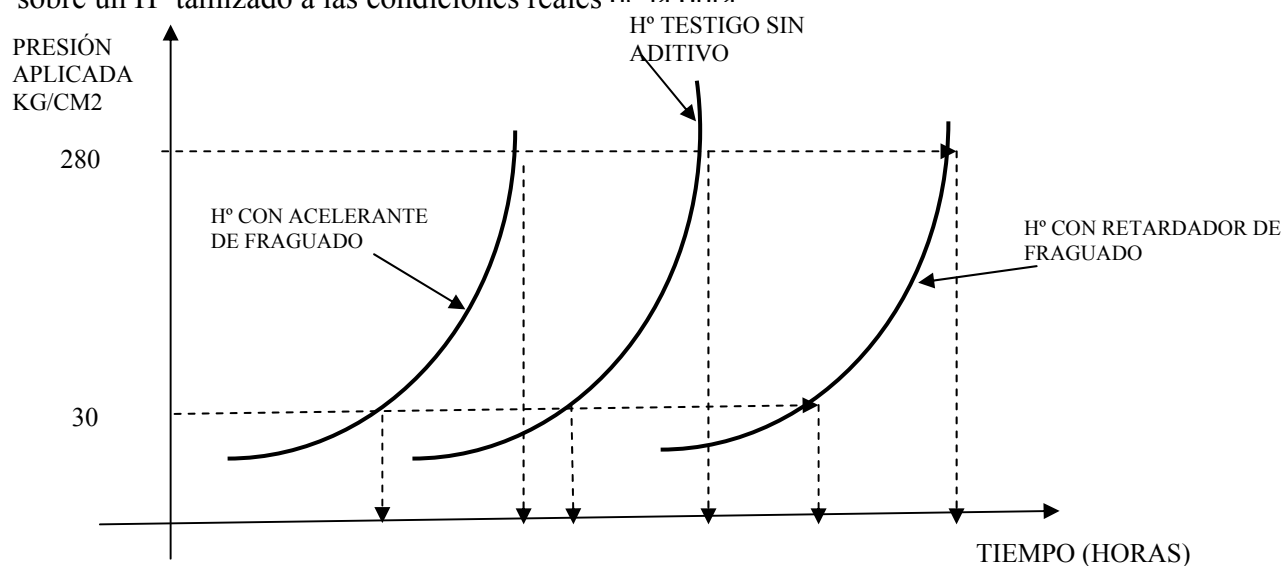


Fig. 3: Curvas de tiempo de fraguado de hormigones con aditivos químicos vs. h° testigo



Finalmente debemos decir que cuando se emplean otros tipos de aditivos químicos, distintos a los aceleradores o retardadores, es de esperar un ligero retraso en el fraguado (de entre una o dos horas) respecto del Hº sin el aditivo.

3.2.2. Trabajabilidad

Se entiende por “trabajabilidad”, a la aptitud que tiene el Hº fresco para ser transportado, colado y terminado con máxima compacidad y ausencia de segregación. En otras palabras, un Hº “trabajable” debe ser transportado sin dificultad mediante los equipos disponibles como ser camiones motohormigoneros o a través de conductos, canaletas, cintas transportadoras, cañerías de bombas, etc. Por otra parte, el colado dentro del encofrado en el cual está dispuesta la armadura, se debe realizar con un trabajo mínimo, logrando que el Hº envuelva perfectamente a la barras de acero y ocupe todos los espacios libres del molde por complicado que resulte el acceso a los mismos. Además la mezcla debe facilitar la eliminación del aire arrastrado a fin de alcanzar la máxima densidad (compacidad) y, por tanto, máxima resistencia. Todas estas acciones se deben realizar manteniendo la homogeneidad de la mezcla, sin que se produzca una separación entre los componentes del Hº, es decir sin segregación.

Algunos autores prefieren definir la trabajabilidad de manera más acotada tratándola como una propiedad intrínseca de la mezcla. De esta manera se define como “la cantidad de trabajo interno útil, requerido para producir una compactación total del Hº”, entendiéndose como “trabajo interno útil” al necesario para vencer la fricción interna que existe entre las diferentes partículas componentes de la mezcla.

Diversos factores influyen en la trabajabilidad del Hº. Podemos mencionar los siguientes:

Forma y textura de los agregados pétreos: cantos rodados tienen menor rozamiento que piedras partidas; superficies lisas tienen menos rozamiento que superficies rugosas. Luego, en uno y otro caso los granos de los áridos se acomodan mejor y de manera más rápida.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso y granulometría del esqueleto granular: mientras mayor sea el diámetro máximo nominal mayor será la cantidad de trabajo requerida para compactar la mezcla. Por otra parte la composición granulométrica tiene mucha influencia en la aptitud de compactación del Hº. Composiciones granulométricas mal graduadas o con excesos de granos gruesos confieren indocilidad al Hº, provocando acunamiento entre los granos e interfiriendo en la movilidad de los mismos. En ambos casos (granos grandes y mala graduación) disminuyen la trabajabilidad del Hº. Por otra parte la composición granulométrica tiene que ver con la obtención de superficies compactas, bien terminadas, sin acumulaciones de gravas (nidos de abeja), sin oquedades, etc., aspectos todos que de una u otra forma definen la trabajabilidad del Hº.

Relación entre los contenidos de agregados gruesos y finos: pequeñas variaciones porcentuales entre los contenidos de agregado grueso y fino, dan lugar a cambios importantes en la aptitud de compactación y terminación superficial del Hº. Se debe observar atentamente el grado de movilidad y la facilidad de acomodo de la mezcla a fin de decidir si es o no necesario variar la relación entre el agregado grueso y la arena. Para tener en cuenta: un agregado tipo piedra partida puede requerir mayor porcentaje de arena que un agregado tipo



canto rodado para una determinada trabajabilidad. La mayor participación de arena facilita el escurrimiento entre los granos del agregado grueso.

Diferencia entre densidades relativas de las diferentes fracciones granulométricas: afectan a la trabajabilidad pues las partículas tienden a separarse, es decir a segregarse debido a su diferente densidad relativa. Este factor crece en importancia mientras mayor resulte la diferencia entre las densidades relativas. Para dar un número aproximado, decimos que se debe estar atento cuando las diferencias entre las densidades relativas entre dos fracciones granulométricas supera el 25% del promedio de las mismas.

Riqueza de la mezcla: partiendo de un H° de 300 Kg/m³ de cemento portland, se dice que a medida que crece el contenido unitario de cemento, la mezcla se vuelve más rica y a la inversa, más pobre. Un mayor contenido de cemento portland da lugar a mayor cantidad de pasta para una determinada movilidad del H°. El exceso de pasta facilita el escurrimiento de los granos disminuyendo la incidencia negativa causada por una mala gradación o una superficie áspera de los granos. En otras palabras: haciendo un H° más rico en cemento portland, mejoramos la trabajabilidad. Como contra partida, aumentamos el costo de la mezcla.

Características propias del cemento portland: los cementos portland de diferente procedencia o clase, tienen distinto comportamiento desde el punto de vista reológico. Algunos permiten obtener hormigones plásticos muy trabajables con una determinada cantidad unitaria. En cambio si se emplea otro cemento portland puede ser necesario aumentar el contenido para obtener igual plasticidad y trabajabilidad.

Empleo de aditivos químicos: los aditivos químicos fluidificantes y plastificantes ayudan a obtener hormigones trabajables sin aumentar el contenido de cemento portland. En efecto: pequeñas cantidades de aditivos químicos (del orden de 1 a 2 Kg/m³), mejoran las imperfecciones de un árido mal gradado u optimizan mezclas aún con buenas curvas granulométricas. También se puede decir que el empleo de aditivos químicos permiten mantener cierto grado de trabajabilidad de un H°, reduciendo (economizando) el contenido unitario de cemento portland sin perder, por supuesto, resistencia mecánica.

Incorporación intencional de aire en la masa del H°. Este es un caso particular de empleo de aditivos químicos. Mediante aditivos especiales se logra incorporar aire intencionalmente en la masa del H°. El aire se incorpora en forma de millones de micro burbujas y la cantidad total varía, según el caso, entre 40 y 70 litros/m³. Esta técnica tiene como principal finalidad, aumentar la impermeabilidad del H°. Sin embargo, el aire intencionalmente incorporado tiene otros beneficios adicionales. Uno de ellos es el papel que desempeñan las micro burbujas similar al de una arena muy fina, con granos redondeados y fundamentalmente sin rozamiento. Este peculiar “árido” mejora notoriamente la reología del H° volviéndolo cremoso, plástico, deformable con alta cohesión que se opone a la segregación.

Relación agua/cemento: como veremos oportunamente, varias propiedades del H° dependen de la relación en peso entre el contenido unitario de agua y el contenido unitario de cemento, comúnmente llamada “relación agua cemento”. Manteniendo constante el contenido unitario de cemento portland, a medida de que aumenta la cantidad de agua decrecen ciertas propiedades importantes del H°, especialmente la resistencia mecánica y la durabilidad. Otras



de las propiedades afectadas es precisamente la trabajabilidad, pues la mezcla tiende a segregarse por mayor dilución del cemento portland ya que dicha dilución desmejora la cohesión de la pasta que aglutina a los áridos.

Temperatura del hormigón: más adelante trataremos especialmente la influencia de la temperatura en el H°. Ahora decimos que una temperatura elevada del H° (digamos mayor de 30°C), favorece la evaporación del agua de amasado provocando una disminución de la movilidad y deformabilidad de la mezcla fresca. Esto se traduce en una disminución de la aptitud para el colado de la misma, es decir: disminuye la trabajabilidad.

Consistencia inicial del H°: Para el colado de diferentes elementos estructurales como ser losas, vigas, columnas, etc., el ingeniero de obra debe elegir con que grado de consistencia preparará el H°. En algunos casos dicha consistencia puede ser “blanda”, en otras puede ser “dura” en otras, muy blanda. Si la consistencia inicial es del tipo “dura” y la temperatura del H° resulta elevada (por encima de 30°C), es probable que a poco tiempo de iniciar el colado, por demoras lógicas del trabajo, el H° pierda agua de amasado debido a la evaporación y adquiera entonces una consistencia demasiado dura dificultándose el colado, es decir el H° pierde trabajabilidad. Una consistencia demasiado blanda, con temperaturas menores de 15°C puede originar diferentes formas de segregación de los componentes. Vuelve a perder trabajabilidad.

Medición de la trabajabilidad:

La trabajabilidad resulta difícil de medir con algún instrumento debido precisamente a que se trata de una especial “aptitud” del H° para satisfacer una serie de condiciones vinculadas al transporte, a la colocación, a la compactación y a la terminación. No obstante, teniendo en cuenta la definición de trabajabilidad como “cantidad de trabajo interno útil requerido para producir una compactación total de la mezcla”, los investigadores han desarrollado una serie de métodos para evaluar dicha aptitud. Entre los más conocidos y aceptados está la “Prueba del Factor de Compactación”. A través de esta prueba se mide el grado de compactación logrado en el H° fresco con una cantidad estándar de trabajo. Si bien se trata de una metodología sencilla al igual que el equipo para realizar el ensayo, la prueba es muy utilizada en las investigaciones de laboratorio pero no en las aplicaciones de obra.

En la obra se ha impuesto por su sencillez, rapidez y fácil interpretación, el ensayo de asentamiento mediante el molde tronco cónico de Abrams. Hacemos notar que este ensayo solamente describe de alguna manera el grado de fluidez y de plasticidad de la mezcla a través de la medición de la consistencia de la pasta. Estas mediciones se correlacionan con la trabajabilidad del H°, pero no se trata de la determinación de la trabajabilidad, tal como definida más arriba.

Como dijimos, se emplea un molde de chapa de forma tronco cónica cuyas dimensiones son: base mayor de ϕ 200 mm; base menor de ϕ 100 mm y altura de 300 mm. Tiene dos estribos para que el operador lo aprisione contra el piso y dos asas para elevarlo (**Fig. N° 4**).

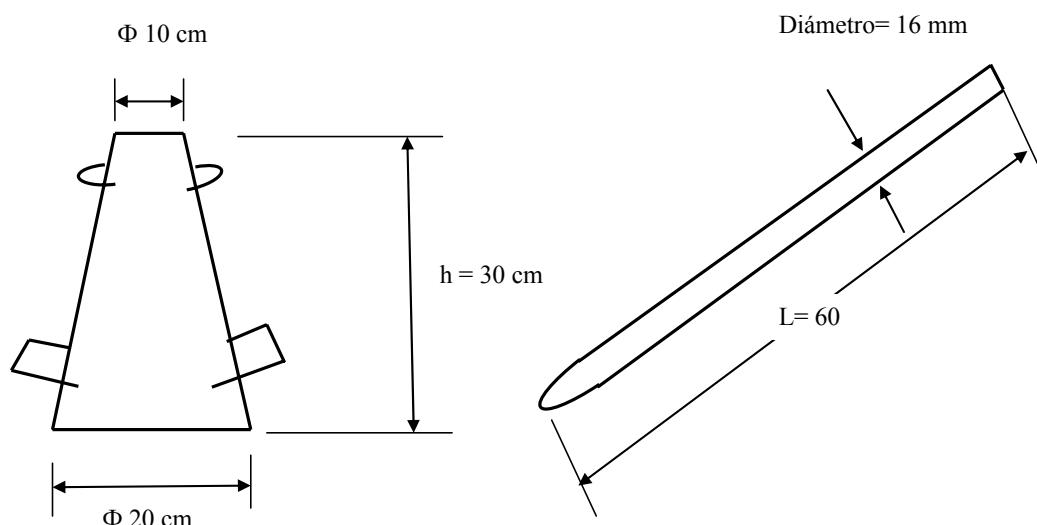


Fig. 4: Molde troncocónico de Abrams y varilla de compactación de extremo roma

Para compactar la mezcla se emplea una varilla metálica con extremo romo de $\phi=16$ mm y 600 mm de longitud. El molde se humedece y se apoya sobre su base mayor en una superficie lisa, no absorbente y húmeda. El operador pisa los estribos con sus pies y procede a llenar el molde con la muestra de H° fresco. El llenado se realiza en tres capas de aproximadamente igual altura y cada una de las capas se compacta con veinticinco golpes de punzonado dados con la varilla de compactación. La varilla debe atravesar la segunda y tercera capa y penetrar 20 mm en la capa subyacente (**Fig. N° 5**).

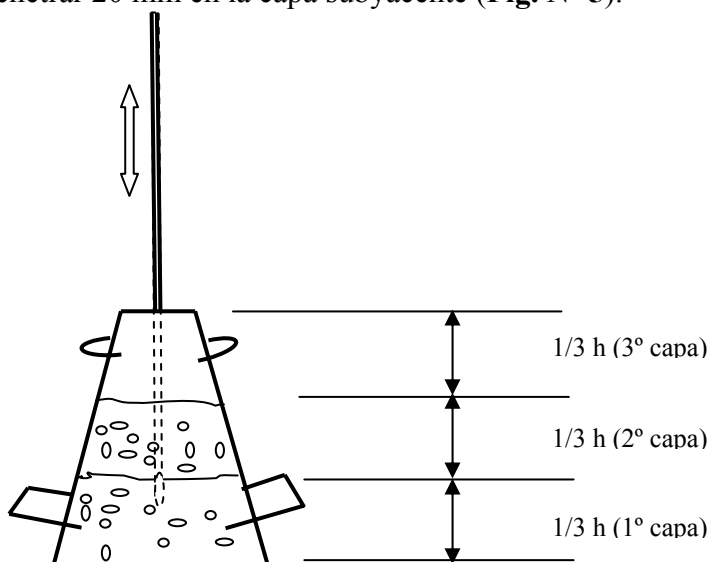
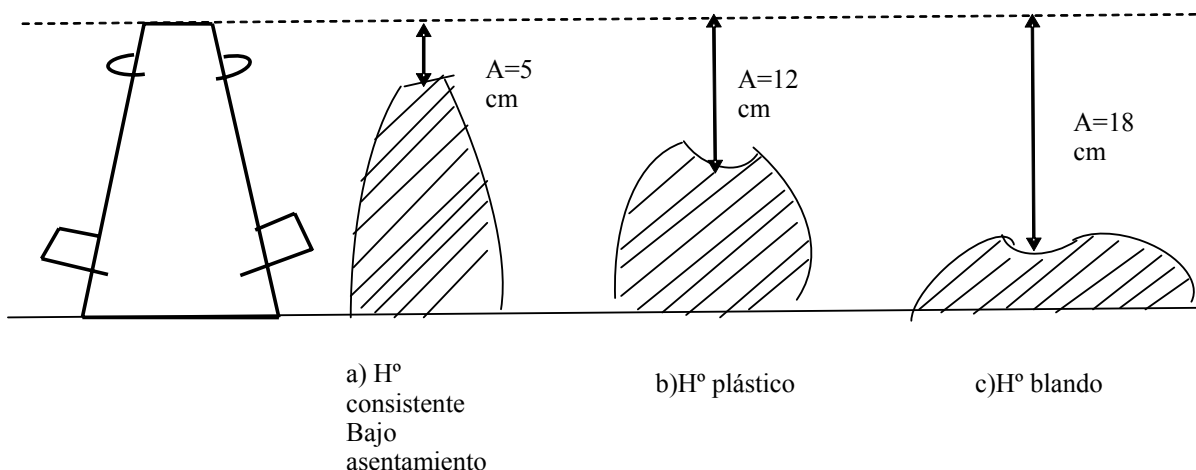


Fig.5: Ejecución del ensayo del cono de Abrams – compactación del hormigón en tres capas de aproximadamente igual altura. se compacta punzonando 25 veces cada capa, distribuyendo los golpes en toda la superficie del h°

Finalizada la compactación, se enrasa la cara superior del molde, y se procede a levantarlo de manera despacio y con velocidad uniforme hasta que el H° quede descubierto. Al levantar el molde, el H° fresco queda sin apoyo y se deforma asentándose (de ahí que la prueba también se llama “de asentamiento”) (**Fig. N° 6**).



Figs.6 y 7 : Medición del asentamiento (consistencia) del hormigón

La disminución de la altura del centro del H° deformado con respecto a su altura inicial de 300 mm, es el “asentamiento” y se lo mide con una regla, redondeando a los 5 mm más próximos (**Fig. N° 7**). Es necesario humedecer la superficie interna del cono y también la de la base de apoyo a efectos de evitar la pérdida de agua propia de la mezcla y también para disminuir la fricción entre el H° y las superficies de apoyo. Por otra parte, antes de levantar el cono, es necesario eliminar todos los restos de H° que hayan caído accidentalmente en torno de la base del mismo a fin de evitar interferencias en la libre deformación y escurrimiento del H°. En la **Fig. N° 7 a), b) y c)** se describen tres asentamientos típicos: a) H° de bajo asentamiento (alta consistencia); b) H° plástico con asentamiento entre 10 y 12 cm; c) H° blando con asentamiento entre 16 y 18 cm. Si en lugar de las formas uniformes descritas en la **Fig. N° 7**, parte del cono se disloca parcialmente como muestra la **Fig. N° 8**, se repite el ensayo por las dudas se deba a una falla del operador. Si el disloque persiste, se concluye que estamos ante un H° con falta de cohesión, disgregable y por cierto con poca trabajabilidad.

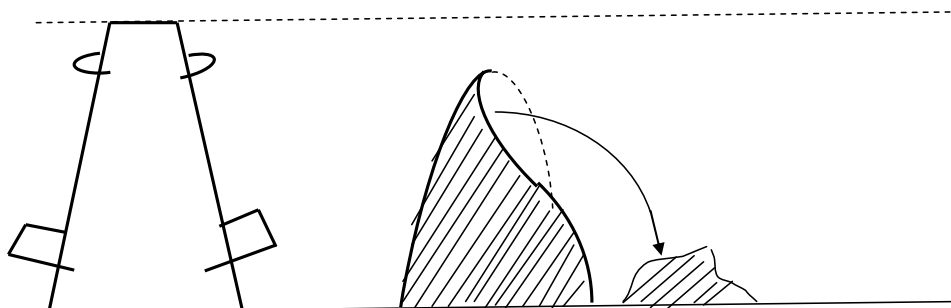


Fig. 8: Hormigón disgregable (al retirar el molde troncocónico, se desprende una porción)

La prueba de “asentamiento” es muy provechosa en la obra. Un aumento o una disminución del asentamiento son indicios de variación de la proporción de los materiales, o de la granulometría de los agregados, o del porcentaje de humedad de los agregados. Como el resultado de la prueba es inmediato, resulta posible introducir rápidamente las correcciones necesarias en la planta hormigonera para restablecer las condiciones de diseño del H° fresco.



3.2.3. Segregación

La segregación es un proceso por el cual los materiales componentes del Hº en estado fresco se separan unos de otros, dando lugar a un desmezclado de la misma. Es decir, la mezcla fresca pierde homogeneidad y las diferentes porciones poseen características propias muy diferentes de las características concebidas para una mezcla homogénea. La consecuencia inmediata de la segregación es la obtención de estructuras con fuertes variaciones de resistencia mecánica entre un lugar y otro, pudiendo en algunos casos, ser nula. Otra consecuencia es la heterogeneidad del aspecto superficial y por supuesto de la masa de la estructura; armaduras a la vista; acumulaciones de grava sin mortero; etc. Una estructura con tales características no es segura desde ningún punto de vista y debe ser demolida con el consiguiente quebranto económico.

La segregación, se manifiesta de dos maneras, a saber:

- a) Separación de las partículas gruesas.
- b) Separación de la lechada cementicia

La separación de las partículas gruesas tiene lugar en mezclas de consistencia seca. En cambio, la separación de la lechada cementicia, se manifiesta en mezclas de consistencia blanda a fluidas.

Las principales causas de la segregación son las siguientes:

- a) Diferencia entre los tamaños de las partículas
- b) Diferencia entre la densidad de los materiales componentes
- c) Deficiencias de manipuleo.

La diferencia entre tamaños de partículas y entre la densidad de los materiales componentes, es una condición intrínseca del Hº. El conocimiento de lo que ocurre en el Hº. El conocimiento y la aplicación de los mismos, permite lograr la suficiente cohesión de la mezcla para evitar que se produzca el fenómeno. De esta manera nos queda en consideración como una de las principales causas de la segregación, las “deficiencias de manipuleo”. En efecto existen prácticas constructivas que se contraponen con las reglas del arte produciendo el desmezclado del Hº. Por ejemplo: descargando el Hº fresco con alta velocidad de llegada al interior del encofrado y haciéndolo chocar contra obstáculos. De esta manera, inevitablemente se produce una dispersión entre los materiales componentes.

Otra mala práctica es transportar durante largos trayectos el Hº fresco en camiones desprovistos de dispositivos de agitación. En este caso los agregados pétreos decantan y se separan de la lechada cementicia. El Reglamento de Hº, CIRSOC 201, prescribe que el transporte del Hº en camiones o recipientes desprovistos de dispositivos de agitación, se limite a una distancia máxima de 5 Km. a condición de que el camino posea suficiente lisura.

Otra práctica que debe desterrarse es verter libremente el Hº desde alturas apreciables (mayor de 1,5 m). La caída libre provoca una real separación de los componentes de la mezcla. Una caída libre de hasta 1,5 m no produce segregación. A partir de este límite se debe esperar una separación de los materiales. Cuando se necesite verter el Hº desde alturas importantes, se realiza la conducción de la mezcla a través de tubería o mangas, manteniendo de esta manera la homogeneidad del Hº.



A veces, para facilitar el colado, se emplean canaletas para conducir la vena de H° fresco. Si la canaleta es muy larga o si ocurren cambios de dirección, puede producir segregación. Otras prácticas que producen segregación es la vibración excesiva del H° fresco para compactarlo y también el uso del vibrador de inmersión como elemento para transportar el H° dentro del molde.

La segregación se evita, en general, dosificando apropiadamente el H°, esto es utilizando una granulometría adecuada y confiriendo cohesión a la mezcla por una parte y por la otra, que es la más perjudicial sino se cumple, adoptando metodologías correctas en el trabajo.

Medición de la segregación

La segregación se detecta visualmente. No existe un método para medirla. En el caso de utilizarse la vibración interna para compactar el H°, existe un ensayo visual para ver si el tiempo de vibrado causa segregación. Consiste en moldear un cubo de 20 cm de lado vibrándolo durante diez minutos. Luego se procede al desmolde y se observa el aspecto de las caras del cubo. Si aparecen acumulaciones de grava, etc. se concluye que hay segregación. Se puede corregir la mezcla, disminuir el tiempo de vibrado o ambas cosas.

3.2.4. Exudación

La exudación es un fenómeno por el cual el agua de amasado del H° in situ, asciende a la superficie. A poco tiempo de finalizar el colado y terminado del elemento estructural, es decir cuando el H° todavía permanece fresco, se observa aflorar el agua de amasado en su superficie. La exudación es un caso particular de segregación pero las causas que la provocan son distintas.

La exudación también se puede catalogar como una “sedimentación” de los materiales componentes más pesados (el agua es el componente más liviano). Cualquiera que sea el punto de vista del fenómeno, el mismo cesa por producirse suficiente rigidización de la mezcla (inicio del fraguado). En otras ocasiones, a pesar de existir exudación, no se aprecia porque las condiciones climáticas reinantes hace que se produzca una rápida evaporación del agua libre exudada.

Las causas de la exudación son atribuibles a la falta de capacidad de los componentes sólidos del H° para retener el agua. Es sabido que mientras exista en el esqueleto granular una cantidad de finos, ($\phi < 0,3$ mm) del orden del 10% o más, la superficie específica es importante y tiene bastante capacidad para retener el agua de mezcla. Sin embargo no es suficiente la presencia de estos finos del esqueleto granular. Se requiere que el cemento portland tenga una molturación suficiente para evitar el fenómeno.

La exudación es causa de efectos indeseables en una estructura de H° A°. En efecto: al ascender el agua de amasado desde la masa hacia la superficie superior, deja tras de sí canalículos capilares que transforma en porosa una masa inicialmente compacta. El H° se vuelve, por tanto más permeable en un plano horizontal y más susceptible a ser dañado por efecto de la congelación. La exudación también da lugar a la formación de una capa superficial débil con posibilidad de agrietamiento y disminución de la adherencia entre el H° y el acero de refuerzo ubicado en esa parte de la estructura.

En el caso de elementos estructurales con predominio de la superficie sobre el espesor como es el caso de losas de pavimentos, el trabajado final para terminar la superficie con cierto



grado de rugosidad, se ve perjudicado por la exudación. Mientras más se trabaja sobre la superficie, más se activa el proceso de afloramiento del agua. El resultado es una capa de H° débil al efecto del desgaste y por tanto la durabilidad del pavimento se ve afectada negativamente.

Los recursos tecnológicos para controlar la exudación son: 1) usar cemento portland de mayor finura. Conviene tomar contacto con el servicio técnico del fabricante del cemento portland a fin de estudiar este aspecto del H°. 2) Incrementar el porcentaje de finos menores de 0.3 mm del esqueleto granular. Requiere emplear una arena fina adecuada. 3) Emplear adiciones minerales pulverulentas para que capten el agua de amasado. 4) Incorporar intencionalmente micro burbujas de aire empleando aditivos químicos específicos. Como contrapartida se debe recordar que la incorporación de aire trae aparejada una disminución de resistencia mecánica del H°. 5) Retardar el inicio de las operaciones de terminación superficial del H°. Esto no evita la exudación pero si limita el incremento de la misma causado por el retrabajado superficial.

Medición de la exudación

La exudación se puede medir en % de agua exudada mediante un ensayo de laboratorio. La Norma IRAM 1604 describe la metodología del ensayo. La experiencia indica que si el porcentaje de agua exudada medida de acuerdo con el ensayo, es menor del 5%, se está en presencia de un H° con débil exudación y no debemos esperar consecuencias negativas por dicha causa. Se hace notar que reglamentos y normas no exigen en particular un porcentaje máximo de exudación para el H° fresco.

3.2.5. Densidad o peso unitario

La densidad o peso unitario del H° es una propiedad intrínseca que proporciona valiosa información sobre la homogeneidad de la mezcla. En efecto: la densidad del H° es el resultado de la participación de cada uno de los materiales componentes. Recordemos que el cemento portland tiene una densidad de 3.150 Kg/m³; los agregados 2.600 Kg/m³; el agua 1000 Kg/m³ y el H° propiamente dicho tiene una densidad del orden de 2.400 Kg/m³. Entonces, si cambian las proporciones de la mezcla en el sentido de que predominan los materiales más livianos, se ve reflejado en una disminución de la densidad del H° en estado fresco y viceversa. Por esta razón algunas especificaciones técnicas limitan la variación de la densidad del H° fresco en $\pm 5\%$ y en algunos casos en $\pm 3\%$, respecto del valor de la densidad teórica del H° que se determina como corolario del proceso de dosificación. La limitación de la variación de la densidad tiene por objeto verificar que se mantengan las proporciones entre los materiales componentes establecidas en el estudio de la dosificación. De esta manera se toman recaudos para asegurar que se alcancen las propiedades previstas para el H° endurecido, especialmente, la resistencia mecánica.

La densidad del H° fresco disminuye cuando el H° endurece. Esta disminución es del orden del 5% y tiene que ver con la evaporación del agua no combinada químicamente con el cemento portland y con las condiciones climáticas que rodean a la estructura.

Medición de la densidad

La densidad del H° fresco es un ensayo muy sencillo que se realiza al pié de la obra. Hace falta una balanza y un recipiente o un molde de probeta. Por diferencia entre el peso del molde enrasado con H° y el peso del molde vacío se obtiene el peso de un determinado volumen de H°.



3.2.6. Variación volumétrica

La variación volumétrica del H° ocurre tanto en estado fresco como en estado endurecido. En esta sección nos ocuparemos de la variación volumétrica en el estado fresco.

Por causas debidas a la combinación química del cemento portland con el agua y también a pérdidas de agua de amasado por evaporación, tiene lugar una disminución del volumen iniciada desde el momento de la colocación en el encofrado. Esta disminución de volumen recibe el nombre de “contracción plástica” debido precisamente a que se produce una reducción del volumen del H° in situ, es decir cuando la mezcla se encuentra todavía en estado plástica.

El efecto inmediato de la contracción plástica es la fisuración o agrietamiento del H°. Como todo tipo de fisura o grieta, la misma se observa a simple vista en las superficies expuestas de los elementos estructurales. Las fisuras originadas por la contracción plástica son características y fácilmente identificables. Para distinguirlas de las fisuras de otro origen, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Aparecen sobre la superficie del H° fresco in situ, después de dos o tres horas de finalizado el colado.
- Son erráticas. Es decir pueden estar en cualquier lugar de la superficie del H° y en cualquier dirección.
- No llegan a los bordes del elemento estructural, sino que terminan en la misma superficie.
- Las aberturas de las fisuras pueden variar entre pocas décimas de milímetro hasta dos o tres milímetros.
- La profundidad de las fisuras puede interesar unos pocos centímetros del espesor de la pieza o todo el espesor de la misma.
- En ocasiones adoptan una orientación de paralelismo entre sí y normal a la dirección de soplado del viento durante el colado.

La **Fig. N° 9** ilustra sobre la forma y distribución de las fisuras en una superficie de una losa de H°.

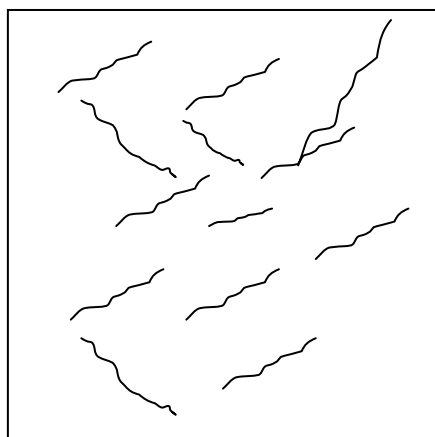


Fig. 9: Fisuras de contracción plástica en una losa de hormigón

Volviendo a las causas que provocan la contracción y fisuración plástica dijimos que una de ellas era la “combinación química del cemento portland con el agua”. En efecto. De acuerdo



con las mediciones de algunos investigadores, al combinarse químicamente el cemento portland con el agua, se produce una disminución de volumen de la pasta equivalente al 1% del volumen absoluto del cemento portland. Para mejor gobierno, supongamos un H° que tiene 350 Kg/m³ de cemento portland. El volumen absoluto de este material es: $350 \div 3,15 = 111,11$ lts. Luego, se debe esperar una disminución de volumen por combinación química de: $1\% \times 111,11 = 1,11$ lts/m³ de H° (0,1 % del volumen). El valor aparenta ser demasiado pequeño para ser causal de fisuración, sin embargo es parte del problema. Algunos cementos portland son más sensibles a la variación volumétrica por combinación química y por tanto resultan más “fisurables” que otros. La demostración mediante ensayos de laboratorio de esta cuestión es muy difícil. La afirmación de que algunos cementos se comportan mejor que otros es una conclusión de la observación de la práctica de obra.

La otra causa de la contracción plástica es la “pérdida de agua” por evaporación del H° fresco colocado y terminado. El agua de amasado abandona violentamente la mezcla y la misma sufre una disminución de volumen debido a fuerzas internas originadas por tensiones capilares en los poros. El agua interna no tiene tiempo de reemplazar el agua que se evapora.

La evaporación de agua se manifiesta con mayor intensidad, cuando mayor es la superficie de H° fresco expuesta al aire. En este aspecto, son las losas (pavimentos; pisos; entresijos; etc.) las más afectadas. Por otra parte, aumentan la evaporación, las condiciones climáticas desfavorables reinantes en el lugar del colado, estas son: humedad relativa ambiente; temperatura ambiente y velocidad del viento. Ensayos realizados por los investigadores, indican que cuando la evaporación alcanza a 1 litro de agua por hora y por metro cuadrado de superficie, la pieza contrae y fisura. Existen ábacos que muestran las diferentes combinaciones de los factores climáticos mencionados relacionadas con la cantidad de agua evaporada.

En la mayoría de los casos, la fisuración de origen plástico no afecta las propiedades estructurales de los elementos constructivos de H° A°. En cambio, perjudica la funcionalidad de los elementos de H° simple como pueden ser las losas de una calzada.

Medidas preventivas para contrarrestar los efectos de la contracción plástica

El H° de cemento portland es un material que en estado fresco tiene la impropiedad de disminuir su volumen por causas intrínsecas (combinación química) y extrínsecas (evaporación del agua de mezcla). Luego, en los casos en donde se requiera obtener un total monolitismo de la estructura, es necesario adoptar especiales medidas de protección del H° fresco, durante el colado, a efectos de que no se fisure por contracción plástica.

- Utilizar el cemento portland más idóneo. Esta información se obtiene a través de la propia observación del comportamiento del cemento portland en la obra o por información de otras obras o por información suministrada por el propio fabricante del cemento.
- Evitar hormigonar cuando las condiciones climáticas son adversas. Por ejemplo, alta temperatura ambiente; fuerte insolación; elevada velocidad del viento y baja humedad relativa. En algunas obras importantes, se acostumbra a obtener el pronóstico de las condiciones meteorológicas para el día del hormigonado.
- Preferir hormigonar por la noche, cuando las condiciones climáticas del día son desfavorables.



- Iniciar inmediatamente la operación de protección del H° fresco recién colado y terminado. La “protección” consiste precisamente en evitar la evaporación del agua de mezcla. Lo más aconsejable es producir sobre la superficie del H° fresco terminado, una niebla de agua con algún soplete apropiado. Por ejemplo se puede emplear un equipo similar al usado para fumigar árboles. Es muy importante que la niebla de agua se aplique de manera continua durante dos a tres horas después de terminada la superficie del H°. En ningún momento se debe permitir que se opaque la superficie del H°, es decir, la superficie del H° colado y terminado se debe mantener brillante durante dos o tres horas luego del colado. Tener presente que se trata de una “niebla” y no de una lluvia. Un simple rociador produciría una lluvia que dañaría la superficie del H° fresco terminado.
- Luego de transcurrido el período crítico de dos a tres horas, el H° in situ comienza a rigidizarse y permite se le aplique otros productos de protección sin dañarse, por ejemplo: aplicación de productos líquidos para formación de una membrana impermeable; colocación superficial de un film de 100 μ de espesor que evita la acción evaporante del viento; colocación de arpilleras húmedas; etc.

4° HORMIGON ENDURECIDO

4.1.- CONCEPTO

Luego de que el H° se ha colocado en el molde, sobreviene un período de rigidización denominado “fraguado”, en el cual la mezcla pierde movilidad pero continúa sin poder resistir cargas. Sin embargo, el proceso químico de hidratación del cemento portland se continúa desarrollando y el H° va adquiriendo resistencia mecánica hasta que, al cabo de 28 días, alcanza el 95% de la hidratación y también de su resistencia mecánica. El proceso de hidratación finaliza al año aproximadamente, pero a los fines prácticos, se considera que a los 28 días el H° adquiere el estado final “endurecido” con un 100% de resistencia mecánica. A partir de los 28 días, toda la resistencia que pueda ganar, incrementa el factor de seguridad del cálculo estructural. La **Fig. N° 12** ilustra sobre la variación de la resistencia mecánica del H° con el transcurso del tiempo.

Entonces, a partir de los 28 días el H° adquiere definitivamente el aspecto de una piedra artificial con una resistencia mecánica importante. En esta situación permanecerá durante su vida útil.

Cuando hablamos de resistencia mecánica, nos referimos fundamentalmente a su capacidad para soportar solicitaciones de compresión. La resistencia del H° a solicitaciones de tracción es baja y sólo alcanza al 10% de su resistencia a compresión. En los cálculos estructurales, se hace trabajar el H° a la compresión, reservando las barras de acero para absorber las tensiones de tracción.

4.2 CARACTERISTICAS DEL HORMIGON ENDURECIDO

Entre las principales características del H° duro o endurecido, veremos las siguientes

- ❖ Resistencia mecánica
- ❖ Elasticidad
- ❖ Fluencia
- ❖ Propiedades térmicas
- ❖ Variaciones volumétricas



4.2.1 Resistencia Mecánica del H° endurecido

La resistencia mecánica del H° duro engloba una imagen general de la calidad del mismo. En general, la resistencia mecánica a compresión se considera la propiedad más valiosa del H°. Mientras mayor resulte la resistencia a compresión del H°, mayor será su capacidad para soportar cargas; mayor será su impermeabilidad y mejor será su comportamiento frente a ciertos tipos de agresiones externas que veremos más adelante cuando hablemos de durabilidad.

La resistencia del H° se origina en la resistencia de la pasta de cemento portland que, a su vez, surge como consecuencia de las reacciones químicas de hidratación del cemento portland con el agua. La resistencia mecánica depende de una serie de factores cuyo dominio es necesario si se pretende actuar sobre la misma. El ingeniero debe conocer los parámetros que debe ajustar para adecuar la resistencia de su H° a las necesidades de la obra. En algunos casos necesitará incrementar la resistencia mecánica a compresión. En otros casos considerará conveniente reducirla, por razones de costo. También necesitará actuar para mantener, dentro de ciertos límites razonables de variación, la resistencia proyectada.

Entre los principales factores que influyen en la resistencia, veremos los siguientes:

- Relación agua – cemento (Pw/Pc)
- Riqueza de la mezcla
- Resistencia intrínseca del cemento portland.
- Grado de compactación del H°
- Granulometría, textura y formas del agregado grueso.
- Edad del hormigón
- Aspectos de laboratorio

4.2.1.1.- Relación agua / cemento

Se designa como “relación agua cemento” al cociente resultante entre el peso del agua de amas en la unidad de volumen de H° y el peso de cemento portland que interviene en el mismo volumen. Por lo general el volumen de trabajo es el “metro cúbico” y las cantidades mencionadas se expresan en Kg/m³. Luego, la relación agua cemento (peso del agua / peso del cemento) es un número adimensional.

En el año 1918, el Investigador Duff Adams, luego de realizar una serie de ensayos (se habla de 50.000 probetas), enunció la célebre “Ley de la Relación Agua/Cemento” que dice lo siguiente: “Para mezclas plásticas, con agregados limpios y bien graduados, la resistencia mecánica y otras propiedades convenientes del hormigón, resultan ser función de la relación que existe entre las cantidades netas en peso de agua de mezclado y de cemento portland que intervienen en la unidad de volumen de hormigón”. El Profesor Adams, expresó su ley mediante la expresión matemática siguiente:

$$F'_{bm} = \frac{A}{B^z}$$

En donde:

F'bm = es la resistencia media a compresión del H°, expresada en Kg/cm²

A y B son constantes que dependen de la edad del H° y de la clase de cemento portland



x = relación agua / cemento (valor adimensional), es decir:

$$Z = \frac{P_w \text{ [Kg/m}^3\text{]}}{P_c \text{ [Kg/m}^3\text{]}} \quad (1)$$

En donde: P_w = es el peso del agua de amasado que interviene en un metro cúbico de H°

P_c = es el peso de cemento portland que interviene en un metro cúbico de H°

Las constantes A y B para una edad del H° de 28 días y para cementos portland clase normal fabricados en el País, valen:

$$A = 1.181,00$$
$$B = 14,58$$

La **Fig. N° 10** representa gráficamente la ecuación (1). Se observa que a medida de que la relación “ Z ” crece, la resistencia mecánica decrece muy rápidamente. Esto se debe a que la relación agua / cemento determina la porosidad de la pasta dura y, mientras mayor resulte la porosidad del H° duro, menor es su compacidad y su resistencia mecánica. La **Fig. N° 11** ilustra lo dicho.

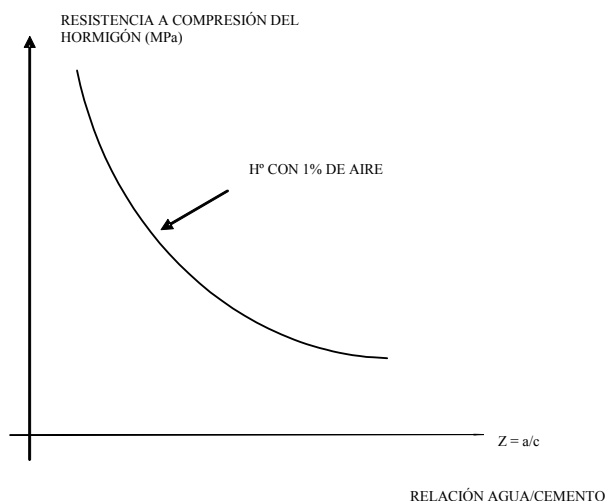


Fig.10: Representación de la Ley de Abrams o Ley de la relación agua-cemento

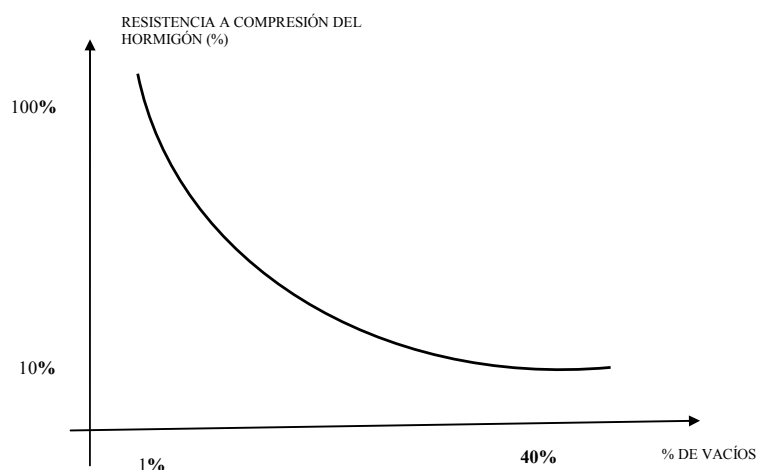




Fig.11: Variación de la resistencia del hormigón con el porcentaje de vacíos (porosidad)

La cantidad de agua necesaria para hidratar completamente el cemento portland es del orden del 18 % del peso del mismo en estado anhidro. Sin embargo, es necesario emplear más del 40% de agua a fin de conferir movilidad a la mezcla y poder colarla. Una vez hidratado completamente el cemento portland, el resto del agua añadida, subsiste por un tiempo en el interior de la masa de H°. Luego poco a poco se evapora hasta que el H° duro alcance el equilibrio con la humedad relativa ambiente. Al evaporarse, el agua deja vacíos capilares en los lugares que ocupaba físicamente. Son estos vacíos los que aumentan la porosidad de la masa (pasta) de H° endurecido.

Aparte de los poros dejados por el exceso de agua, existen otros vacíos producidos por aire arrastrado durante el colado. En efecto: tanto el proceso de mezclado del H° fresco, como así también la metodología de colado da lugar a formación de burbujas de aire que se adhieren a los granos de la mezcla y que deben eliminarse mediante la “compactación” del H° fresco. Veremos más adelante que para obtener la máxima compacidad del H° fresco colado, es necesario densificarlo mediante potente vibradores de inmersión. Aún con esta técnica, siempre queda aire remanente en la masa del H° compactado. Este volumen de aire remanente puede variar entre el 1% y el 2% (es decir, entre 10 y 20 litros de aire en forma de micro burbujas, por metro cúbico de H°).

4.2.1.2.- Riqueza de la mezcla

La cantidad de cemento portland que interviene en la unidad de volumen de H°, se denomina de diferentes maneras, v.g. “tenor cemento”; “factor cemento”; “contenido unitario de cemento”; etc. El tenor cemento tiene mucha influencia en el nivel de resistencia mecánica que alcanza el H° duro. A medida de que se eleva el tenor cemento, mayor es la resistencia mecánica a compresión que se alcanza. Esto es así hasta una cierta cantidad de cemento portland, a partir de la cual, por más que se aumente su participación, la resistencia no crece. Se ha llegado a un valor máximo de resistencia para un contenido también máximo de cemento portland.

Se dice que un H° es rico en cemento portland o simplemente “rico”, cuando el tenor cemento supera los 350 Kg/m³ aproximadamente. Por el contrario, estamos en presencia de hormigones pobres, cuando el tenor cemento comienza a disminuir de 280 Kg/m³ aproximadamente. Si el tenor cemento varía entre 280 y 350 Kg/m³, estamos dentro de contenidos unitarios normales. Todos los valores mencionados son cifras arbitrarias.

De todas maneras debemos saber que los valores extremos de contenidos unitarios de cemento portland se ubican en 100 Kg/m³ para los hormigones pobres y 550 Kg/m³ para los hormigones muy ricos. El Reglamento CIRSOC limita a 500 Kg/m³, el valor máximo del tenor cemento y en 100 Kg/m³ el valor mínimo. A los fines de obtener H° A° durable, se establece un mínimo de contenido unitario de cemento portland con el objeto de que quede asegurada la protección alcalina de la armadura resistente. El Reglamento CIRSOC establece para el H° A° estructural un contenido unitario mínimo de cemento portland de 280 Kg/m³.

En muchos casos, cuando no se necesita mucha resistencia mecánica y tampoco importe la durabilidad, por ejemplo en el caso de obras provisorias de H° A°, se trabaja con bajos tenores cementos: 200 Kg/m³ o menos. Se debe tener en cuenta que el cemento portland es el componente más costoso de la mezcla, luego, es necesario utilizar lo que hace falta y no más.

En cambio, en los casos de obras de hormigón simple masivo para diques de contención, se trabaja con hormigones pobres cuyo tenor cemento oscila entre 150 y 250 Kg/m³. Esto se



debe a varias razones. Principalmente se pretende reducir al máximo el calor dentro de la masa del Hº, provocado por la hidratación química del cemento portland que se realiza con desprendimiento de calor, es decir se trata de un proceso exotérmico de fraguado. El calor acumulado en la masa, primero dilata la misma comprimiéndola; luego, cuando se enfría, da origen a tensiones de tracción que no son soportadas por el Hº simple, produciéndose fisuras inadmisibles en este tipo de obra. Por otra parte, por tratarse de una masa de Hº simple, no es necesario un tenor cemento mínimo para proteger armaduras contra la corrosión pues dichas armaduras son inexistentes.

Mezclas ricas, con altos contenidos unitarios de cemento portland, conllevan el riesgo de fuertes variaciones volumétricas por causas de origen térmico o químico. Estas variaciones volumétricas tienen lugar cuando el Hº ha endurecido y son distintas a las debidas a la contracción plástica. Por cierto, también originan fisuras y agrietamiento de los elementos estructurales.

4.2.1.3.- Resistencia intrínseca del cemento portland.

El cemento portland, luego del fraguado y endurecimiento, alcanza diferentes grados de resistencia mecánica intrínseca, conforme a sus propias características físico químicas. La resistencia intrínseca a compresión del cemento portland se mide a diferente edad, como sabemos, sobre probetas cúbicas de 4 x 4 x 4cm, moldeadas con un mortero 1:3 (1 parte en peso de cemento portland y tres partes en peso de arena normal). De acuerdo al valor de las resistencias media y mínima 28 días, se califican los cementos portland por resistencia. Así tenemos: cementos portland CP30; CP40 y CP50. Esto significa que tienen resistencias a compresión a 28 días de 30 MPa, 40 MPa y 50 MPa respectivamente.

Volviendo ahora al Hº, preparado con un determinado tenor cemento, su resistencia final a 28 días será distinta, según la resistencia intrínseca del cemento portland empleado.

4.2.1.4.- Grado de compactación del Hº

Ya hablamos de esta cuestión en el apartado 4.2.1.1, cuando nos referimos a la relación agua cemento y a las consecuencias de los poros de aire dejados tanto por el agua excesiva de empaste como también a los poros de aire arrastrados durante el proceso de mezclado y colado.

El grado de compactación o densificación del Hº, está directamente vinculado a la resistencia mecánica del mismo pues afecta al volumen de poros de la masa. A mayor volumen de poros o vacíos, menor es la resistencia del Hº. El gráfico de la **Fig. N° 11** es elocuente.

Para densificar el Hº, es necesario compactarlo eficazmente en oportunidad del colado del mismo en el encofrado. El método más idóneo es la vibración de alta frecuencia. La vibración tiene como efecto instantáneo, la fluidificación de la mezcla. Se anulan las fuerzas internas de rozamiento entre los diferentes materiales componentes del Hº, dando lugar a un perfecto acomodamiento de los mismos. Cada componente termina ocupando un mínimo espacio dentro de la masa. Las burbujas de aire se desprenden de la masa y se disipan en la superficie de la misma.

Para vibrar el Hº, se emplean diferentes equipos. El más práctico en la obra es el llamado “vibrador de inmersión”. Consiste en un elemento cilíndrico vibrante, en forma de aguja de 1” a 2” de diámetro y 15” a 20” de longitud, vinculado a través de una manguera a un circuito neumático. El aire comprimido hace funcionar al vibrador. Se requiere disponer de un compresor. Otros equipos son de accionamiento eléctrico. En este tipo, el elemento vibrante



posee un eje excéntrico que rota por el movimiento que le confiere un eje flexible que viaja dentro de la manguera que lo vincula a un motor eléctrico.

En cualquier caso, el vibrador se introduce funcionando y por su propio peso, dentro de la masa de H° fresco, durante el colado. Luego se lo extrae lentamente. La influencia del vibrador alcanza aproximadamente un radio de 0,50 m por lo que es necesario introducirlo varias veces en la masa del H° fresco para lograr la compactación deseada. Existen otros tipos de vibradores de los que hablaremos más adelante.

4.2.1.5.- Granulometría, textura y formas del agregado grueso.

En el capítulo dedicado a los áridos para H°, hablamos con profusión del importante rol que juega la granulometría en las propiedades del H°. Recordemos la influencia del agregado grueso en la resistencia mecánica del H°.

La **forma de los granos** del árido grueso determinan la aptitud de compactación del H° fresco, es decir la mayor o menor facilidad para densificarlo. A partir de este punto nos remitimos a lo dicho en el parágrafo anterior 4.2.1.4. relativo a la influencia de la densificación en la resistencia.

La **textura de los granos** del árido junto con **las formas** de los mismos determina la cantidad de agua necesaria para amasar el H° con una determinada consistencia. Ya vimos en 4.2.1.1 como influye el agua de amasado del H°, para un tenor cemento constante. Por otra parte, la textura de los granos tiene influencia en la adherencia “pasta-agregado” y se ha demostrado que mayor es la resistencia mecánica del H°, cuanto mayor sea dicha adherencia, especialmente en el caso de los hormigones de alta resistencia ($F'_{bm} \geq 50$ MPa). En el caso de hormigones normales ($F'_{bm} < 50$ MPa), los áridos con granos lisos y limpios no afectan mayormente a la resistencia.

La **resistencia propia de la roca** que constituye los granos del árido tiene gran influencia en la resistencia del H° en el caso de agregados débiles es decir, menos resistentes que la pasta cementicia. En cambio la resistencia mecánica del H° no aumenta notablemente cuando la resistencia propia de la roca del árido supera a la resistencia de la pasta cementicia. Esto se debe a que la rota cía. Esto se debe a qutravés del medio menos resistente o en la interfase pasta – agregado.

La **composición granulométrica** del árido tiene un importante papel en las propiedades del H°, y particularmente en su resistencia mecánica. Para comenzar, una granulometría óptima disminuye la superficie específica del agregado total lo cual significa menor demanda de agua para una determinada consistencia y por tanto, mayor resistencia. Sin embargo, para un diámetro máximo nominal mayor de 38 mm ocurre una compensación entre la ganancia de resistencia por menor demanda de agua y la pérdida de resistencia por menor superficie de adherencia pasta – agregado. Asimismo, los tamaños de granos mayores de 38 mm provocan cierto grado de discontinuidad en la mezcla que afecta negativamente a la resistencia mecánica.

Los tipos de granulometría continua, es decir, las que contienen todos los tamaños de granos, conllevan la ventaja de facilitar el empaquetado y la densificación del H° fresco durante el colado y compactación y estamos nuevamente en lo dicho en el parágrafo 4.2.1.4



4.2.1.6.- La edad del hormigón

La resistencia del H° se desarrolla y crece con el transcurso del tiempo. Esta cuestión está relacionada directamente con el proceso de hidratación del cemento portland.

La Fig. N° 12 muestra la variación de la resistencia mecánica de una mezcla con una determinada relación agua – cemento en función del tiempo. Se observa que la resistencia alcanza entre un 90% y un 95% de su valor final a la edad de 28 días. A efectos de los cálculos estructurales, se considera la resistencia a 28 días, ($F'_{b\ 28d}$), como “resistencia final o máxima del H°”, quedando la ganancia de resistencia posterior a 28 días como una contribución a la seguridad de las estructuras.

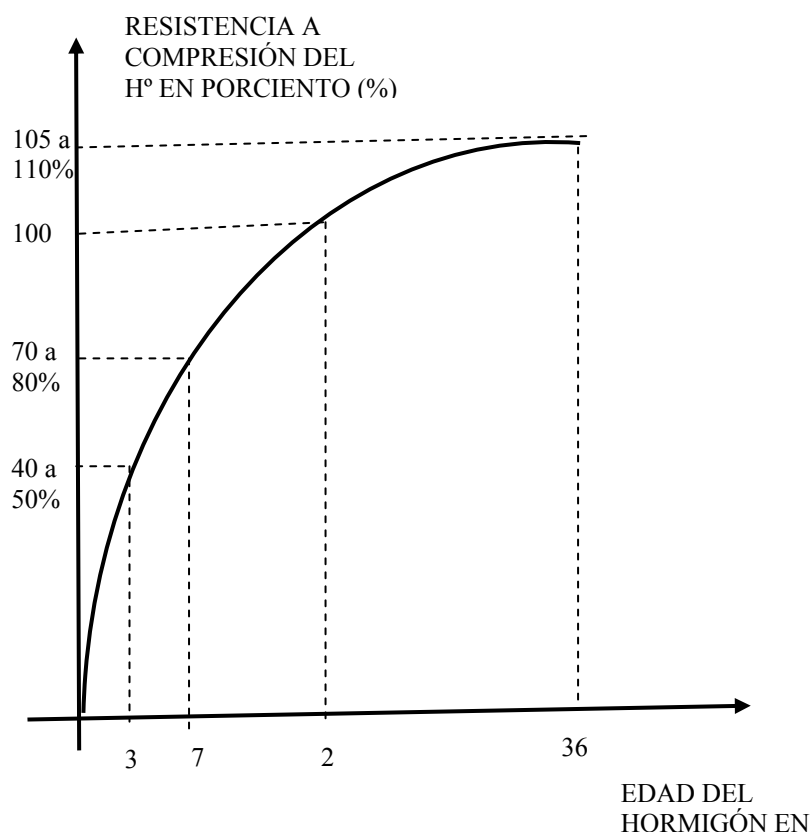


Fig. 12: Variación de la resistencia del hormigón con la edad

El desarrollo a través del tiempo de las resistencias mecánicas de un H° preparado con cemento portland tipo normal, sigue una cierta ley independientemente de otras propiedades de la mezcla como por ejemplo el “contenido unitario de cemento” de la misma. Esto hace posible diagnosticar dentro de ciertos márgenes de error, cual será la resistencia a 28 días conociendo el valor de la resistencia a una edad menor. En términos generales podemos decir lo siguiente:

$$F'_{b\ 3\ d} \approx 0,40 \text{ a } 0,50 F'_{b\ 28\ d}$$

$$F'_{b\ 7\ d} \approx 0,70 \text{ a } 0,80 F'_{b\ 28\ d}$$



Algunos investigadores se ocuparon de esta cuestión y plantearon ecuaciones matemáticas que vinculan la resistencia mecánica a una determinada edad, con una resistencia a edad inferior conocida. Entre las más célebres de estas ecuaciones mencionamos la Fórmula de Ros:

$$F'_{bT} = F'_{b28} \frac{a \cdot T^{2/3}}{b + T^{2/3}}$$

F'_{bT} : Resistencia a compresión del H° a la edad de T días

F'_{b28} : Resistencia a compresión del H° a la edad de 28 días

T : edad del H° en días

a y b: coeficientes que dependen del cemento portland y de la consistencia del H°

Para H° de consistencia plástica: a = 1,50; b= 4,61

La Fórmula de Ros intenta abarcar de una forma general la relación entre el tiempo y la resistencia a compresión del H°. En la práctica es más frecuente la necesidad de conocer dicha relación en un intervalo reducido. Por ejemplo, si se desea diagnosticar el valor de la resistencia a 28 días, partiendo de valores de resistencia a edad menos avanzada (3 o 7 días) lo corriente es aplicar los coeficientes mencionados más arriba.

4.2.1.7.- Factores de laboratorio que influyen en la resistencia del hormigón

Entre los principales factores de laboratorio que influyen en la determinación de la resistencia del H°, tenemos:

- a) Forma y tamaño de las probetas
- b) Esbeltez de la probeta
- c) Rectificado de la superficie de la probeta en donde se aplica la carga
- d) Centrado de la probeta en la prensa de ensayos
- e) Condiciones de humedad de la probeta
- f) Velocidad de aplicación de la carga

a) Forma y tamaño de las probetas

La resistencia a compresión del H° se determina ensayando probetas de forma cilíndrica. En nuestro País, la probeta normalizada por IRAM coincide con la norma americana y tiene por dimensiones: $\phi = 15$ cm y altura = 30 cm. En otros países (Alemania) se emplean probetas cúbicas de 20 cm de lado. Para un mismo H°, si se emplean probetas de distinta forma se obtienen resistencias distintas. Por ejemplo, la relación entre resistencias cúbicas R_w (cubos de 20 cm de lado) y resistencias cilíndrica R_c ($\phi = 15$ cm y $h = 30$ cm) resulta ser:

$$R_w \approx 1,15 R_c$$



Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que a medida de que disminuye el tamaño de la probeta, se obtienen valores más altos de resistencia. Esto ocurre tanto en probetas cilíndricas, como así también en probetas prismáticas y cúbicas. Por ejemplo, la relación entre resistencias a compresión del mismo H° , obtenidas mediante probetas cúbicas de distinta longitud de arista, resulta:

$$R_{w30} = 0.90 R_{w20}$$

$$R_{w20} = 0.85 R_{w10}$$

R_{w30} : Resistencia medida a través de probetas cúbicas de 30 cm de lado

R_{w20} : Resistencia medida a través de probetas cúbicas de 20 cm de lado

R_{w10} : Resistencia medida a través de probetas cúbicas de 10 cm de lado

Finalmente hacemos notar que las diferencias entre valores de resistencias obtenidas con probetas de distinta forma, varían entre ciertos límites y los resultados también dependen de la relación que existe entre la menor dimensión de la probeta y el tamaño máximo nominal del agregado grueso del H° . Para eliminar la influencia del grano máximo, se especifica que la menor dimensión lineal de la probeta (en nuestro caso el $\phi = 15$ cm) debe ser como mínimo igual a tres veces el diámetro máximo del agregado grueso. Dicho de otra forma: los moldes normales de $\phi = 15$ cm y altura 30 cm, sirven para moldear probetas de hormigones que posean un agregado grueso con diámetro máximo nominal de hasta 50 mm.

b) Esbeltez de la Probeta

La esbeltez es la relación entre la altura de la probeta y la dimensión típica de la base de la misma. En el caso de probetas cilíndricas normales, la esbeltez es: $h/\phi = 30/15 = 2$; En el caso de un cubo, la esbeltez es igual a uno y en el caso de probetas prismáticas, la esbeltez viene dada por la relación entre la altura del prisma y la dimensión del lado menor de la base. (h/d_{\min}).

En general, a menor esbeltez, mayor resulta el valor de la resistencia a compresión del H° . Para una esbeltez =1, la resistencia resulta un 20% mayor que para una probeta con esbeltez =2

La resistencia del H° , varía con la esbeltez de la probeta en razón de la influencia del rozamiento de los platos o cabezales de la máquina de ensayo con la superficie de compresión de la probeta. Este rozamiento es equivalente a un “zunchado” de la probeta en la zona de contacto con el plato de carga de la prensa. Este zunchado dificulta la libre dilatación transversal de la probeta cuando actúa la carga de compresión y es tanto más apreciable, cuanto menor es la esbeltez. Se ha demostrado experimentalmente que una probeta con esbeltez = 2 es la que menos acusa en el resultado la influencia del rozamiento mencionado, de ahí que se ha adoptado esta esbeltez para las probetas normalizadas. El rozamiento en las superficies de apoyo es la causa de que se formen los llamados “conos de compresión” en el caso de probetas cilíndricas o de “pirámides de compresión” en el caso de probetas cúbicas o prismáticas. **Fig. N° 13 a y b.**

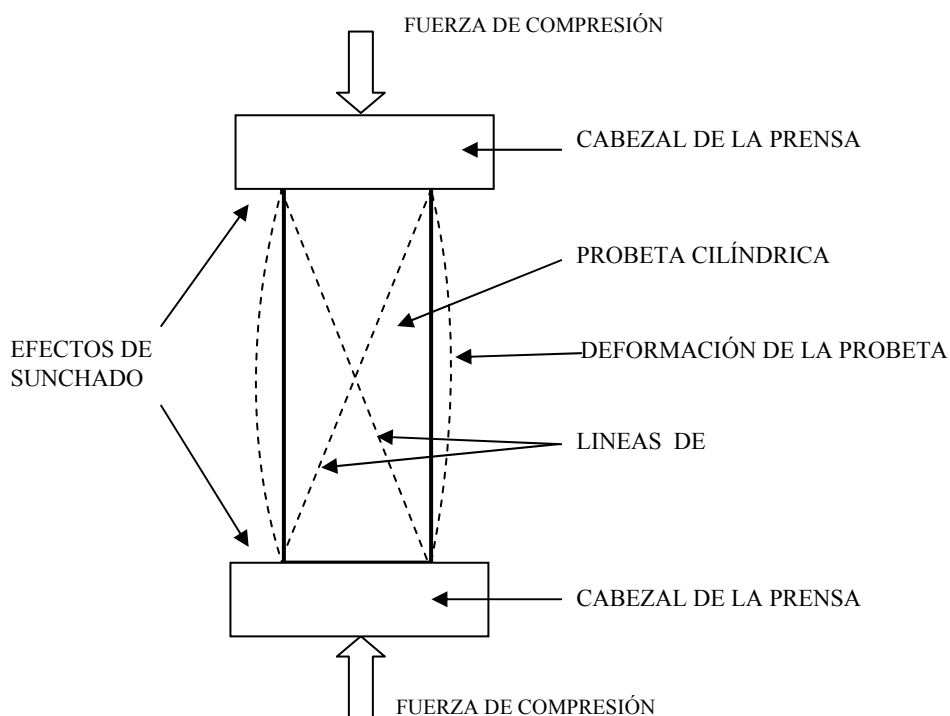


Fig. 13 a): Mecanismo de rotura por compresión de una probeta cilíndrica

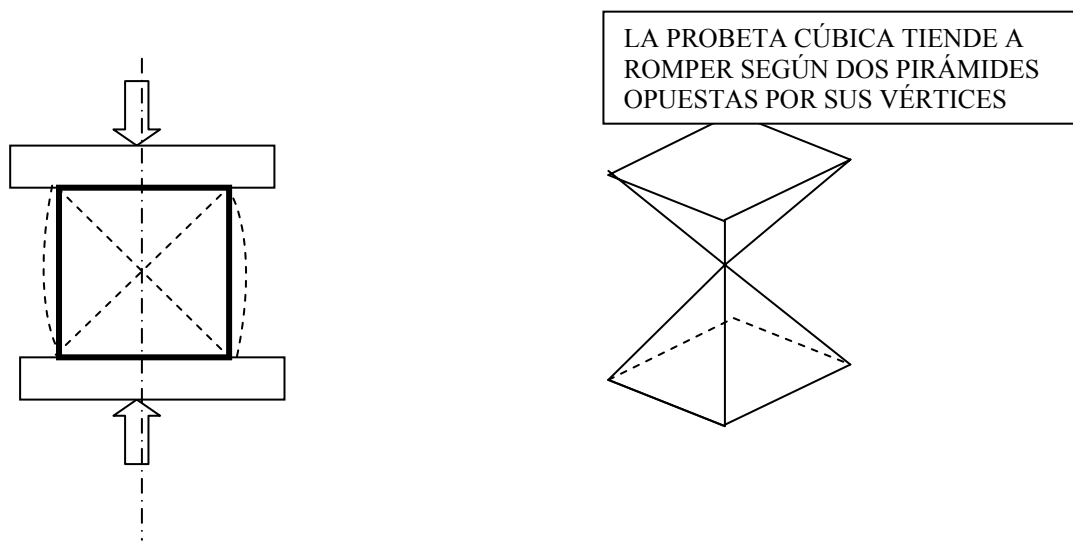


Fig. 13 b): Mecanismo de rotura por compresión de una probeta cúbica

En algunas oportunidades es necesario comprobar la resistencia efectiva del H° de una determinada estructura existente. En tal caso se procede a extraer probetas testigos mediante máquinas caladoras. A veces sólo es posible calar con brocas de 100 o 50 mm de ϕ y esbelteces inferiores a 2. Entonces se ensayan a compresión dichos testigos y luego se corrige mediante coeficientes de esbeltez tabulados a fin llevar los resultados a ser equivalentes a los de probetas de esbeltez igual a 2. La Norma IRAM 1505, proporciona una tabla con dichos coeficientes de corrección.

Las normas y reglamentos no autorizan ensayar probetas con esbeltez menor de uno (1) pues las resistencias se incrementan notablemente por el llamado efecto placa.



c) Rectificado de la superficie de la probeta en donde se aplica la carga

Los platos de carga de la prensa de ensayo deben apoyar sobre superficies perfectamente planas de las probetas a fin de lograr uniforme distribución de la carga. Si esto no sucede, los resultados son inferiores a los reales, pues la carga se concentra en las irregularidades de la superficie provocando la rotura para valores inferiores de los que correspondería si la carga se distribuyese en toda la superficie. La **Fig N° 14 a y b** ilustra sobre este particular. Las probetas cúbicas fabricadas en moldes de fundición con caras rectificadas, se someten al ensayo de resistencia a la compresión, dándoles un giro de 90°, es decir la carga se aplica en dirección perpendicular a la de llenado del molde, pues la superficie libre de la probeta (terminada con llana) siempre resulta irregular. En el caso de la probeta cilíndrica es necesario rectificar ambas superficies de las bases antes de realizar el ensayo de compresión. Esta operación se conoce con el nombre de “encabezado”. La rectificación o encabezado se realiza aplicando sobre ambas bases, un enlucido compuesto por una mezcla en caliente de azufre, grafito y arena muy fina. También se puede aplicar una mezcla cementicia.

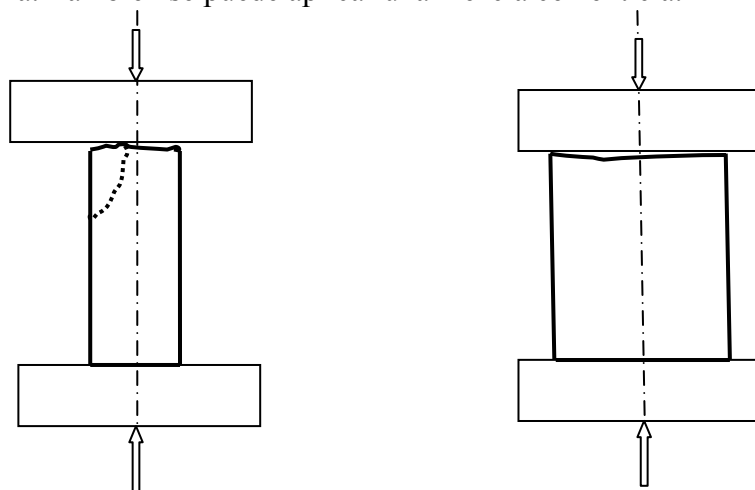
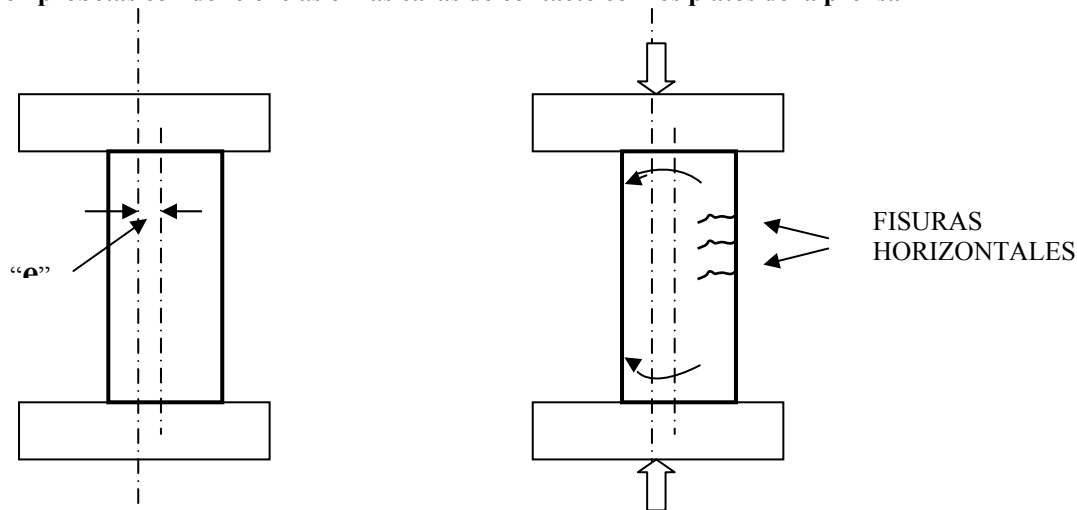


Fig.14: Líneas de rotura en probetas con deficiencias en las caras de contacto con los platos de la prensa



a) El eje de la probeta no coincide con el eje de la prensa

b) Se produce flexo - tracción

Fig. n° 15: Influencia de la excentricidad de la probeta

a) Centrado de la probeta en la prensa de ensayos

El eje de la probeta debe coincidir con el eje de los platos de carga de la prensa de ensayo. Si esto no ocurre, la probeta se haya descentrada y la carga aplicada no es compresión pura, sino



de flexocompresión. Según sea la magnitud de la excentricidad de la carga, se obtienen valores de resistencia que resultan inferiores a la resistencia real del H°. Ver **Fig. N° 15 a y b**

b) Condiciones de humedad de la probeta

Las probetas deben ensayarse en estado húmedo. De esta manera, las presiones internas se transmiten a través del agua de los poros a toda la masa de H° dando por resultado un valor de resistencia inferior al que se obtendría si la probeta estuviese totalmente seca. Esta manera de realizar el ensayo con probeta húmeda, está del lado de la seguridad de la estructura.

c) Velocidad de aplicación de la carga

Una mayor velocidad de aplicación de la carga tiene como consecuencia un resultado más elevado de la resistencia a compresión porque la probeta dispone de menos tiempo para deformarse. Por el contrario, una carga aplicada muy lentamente arroja resultados de resistencias más bajos. Las normas establecen que la velocidad de aplicación de la carga debe estar comprendida entre 2 y 3 MPa por segundo

4.2.2.- Elasticidad del hormigón endurecido

Un material es elástico cuando su deformación desaparece al cesar la carga o esfuerzo que la produjo. El H° es elástico hasta cierto grado. Dicha elasticidad se estudia analizando la deformabilidad del H° cuando el mismo es sometido a cargas de corta duración.

Si se ensaya una probeta cilíndrica de H° a compresión simple y se toman lecturas de las deformaciones que experimenta la misma en correspondencia con los incrementos de carga aplicados, se obtiene una curva σ - ϵ como la que ilustra la **Figura N° 16**. Para la tensión de rotura σ'_{br} , la deformación específica ϵ'_{br} alcanza valores del orden de $\epsilon'_{br} = 0,0015$. Los investigadores han determinado que, tomando recaudos especiales y midiendo con precisión, las deformaciones específicas son por mucho mayores, semejantes a las que experimenta la fibra más comprimida en una viga de H° A°.

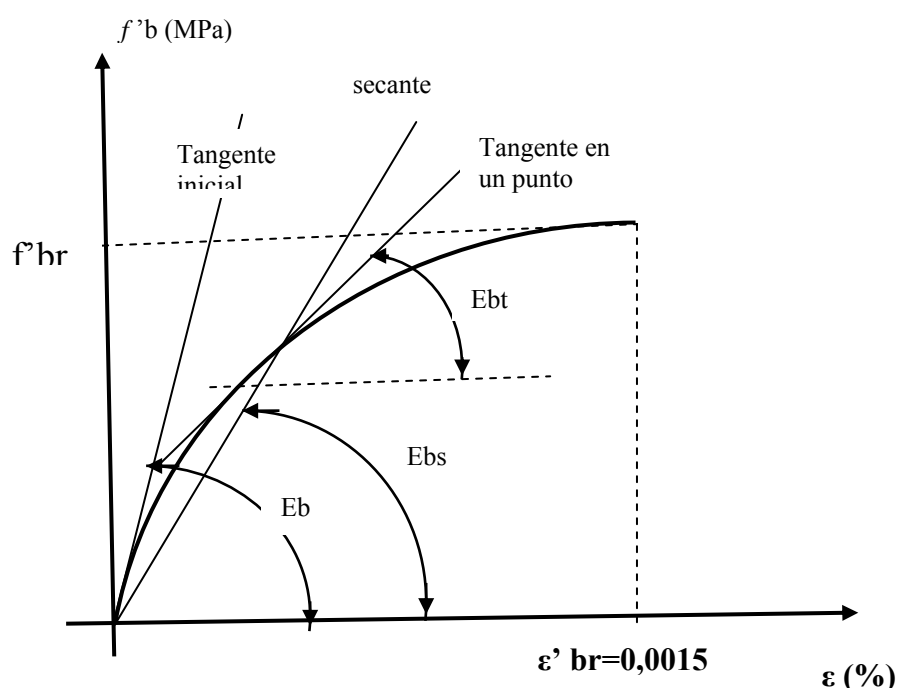


Fig.15: Determinación de diferentes módulos de elasticidad del hormigón

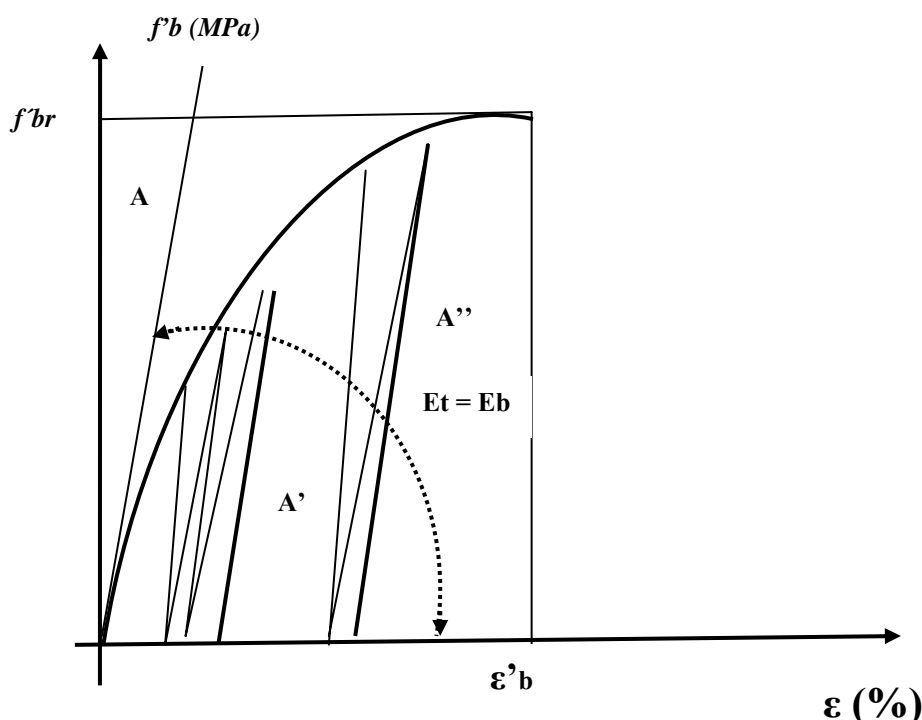


Fig. 16: Determinación experimental del módulo de elasticidad inicial del hormigón

El investigador alemán Bach, propuso para la curva σ - ϵ del Hº, la siguiente expresión matemática:

$$\epsilon'_b = \alpha \sigma'_b{}^m$$

En donde: “ α ” es un coeficiente variable con la calidad del Hº ($\alpha \equiv 1/E_b$)

“ m ” está comprendido entre 1,14 y 1,16, según Bach.

Como se aprecia en la curva σ - ϵ de compresión del Hº, no existe una parte recta del período elástico como en el caso del acero. De hecho tampoco existe, por tanto, un módulo elástico en el sentido estricto de la expresión, pudiéndose sólo considerar como tal a un valor convencional más o menos arbitrario.

Si en lugar de cargar la probeta hasta la rotura, se la comprime sólo hasta cierto valor y luego se la descarga, ésta se produce a lo largo de una línea más empinada que la O-A, quedando la probeta con una deformación permanente. Volviendo a cargar y descargar varias veces hasta el mismo valor de la tensión (**Fig. N° 17**), la curva, dentro del rango de repetición de carga, se transforma en una línea casi recta, que tiene una inclinación aproximadamente igual a la parte inicial de la curva de primera carga. Incrementando la tensión y volviendo a repetir el ciclo, se obtiene el mismo resultado. Por esta circunstancia se acostumbra definir como módulo de elasticidad del Hº o módulo de Young a la inclinación de dicha parte inicial; es decir el módulo de elasticidad “**E_b**” es la pendiente en el origen de la curva σ - ϵ o la parte inicial “recta” de dicha curva si se distinguiese.



$$E_b = \tan \alpha = \sigma' b / \varepsilon$$

En donde $\sigma' b = P_i / \Omega$ y $\varepsilon = \Delta l / L$; Ω = sección transversal de la probeta

El valor del módulo de elasticidad inicial E_b varía entre 250.000 y 450.000 Kg/cm².

También se pueden definir otros valores del módulo elástico. Por ejemplo si se quiere determinar la deformación total inicial que va a experimentar un H° hasta una tensión determinada, se puede definir un “módulo de elasticidad secante” “ E_{bs} ” (Fig. N° 16). Asimismo, para cada tensión se puede considerar un módulo de elasticidad tangente “ E_{bt} ” que es válido sólo para la primera puesta en carga rápida pues las deformaciones plásticas modifican su valor con el tiempo.

Para el cálculo de deformaciones de estructuras (v.g. vigas), bajo la acción de cargas de corta duración, se utiliza el módulo de elasticidad inicial “ E_b ”. El valor de E_b ha sido estudiado con un gran número de ensayos a fin de determinar cómo varía con la forma de carga y con la calidad del H°. De estas experiencias se deduce que el módulo de elasticidad inicial varía en forma muy general con la resistencia del H°. Representando los valores de E_b , sacados de un gran número de ensayos, en función de la resistencia a compresión del H°, se obtiene una cantidad de puntos distribuidos con una dispersión relativamente grande a través de los cuales se pueden trazar curvas aproximadas. **Fig. N° 18.**

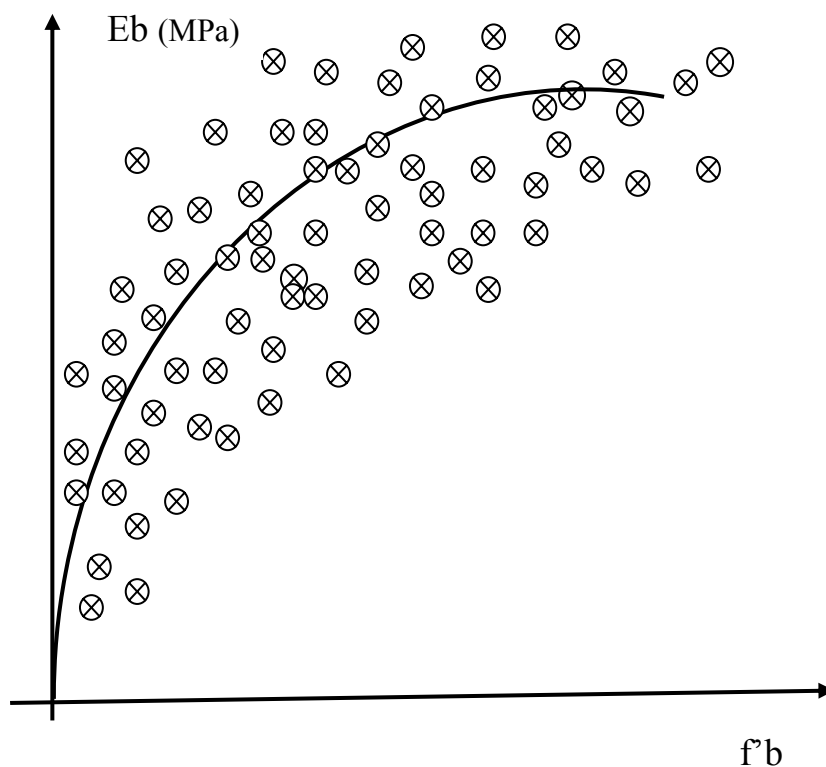


Fig. 18: Relación entre la resistencia a compresión del hormigón y su módulo de elasticidad inicial



Diversos investigadores han propuesto fórmulas para curvas como la ilustrada en la Fig. 18. Estas fórmulas relacionan E_b con la resistencia del Hº a compresión: σ'_{br} a la edad en que se determina el módulo. Por ejemplo el American Concrete Institute (A.C.I.), establece para un Hº normal, la siguiente fórmula:

$$E_b = 15000 \sqrt{\sigma'_{br}} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

El Reglamento CIRSOC 201, establece diferentes valores del módulo de elasticidad según sea la resistencia característica del Hº, a saber:

Resist. característ. Hº (MPa)	8	13	17	21	30	38	47
Eb en Kg/cm ²	175.000	240.000	275.000	300.000	340.000	370.000	390.000

La curva σ - ϵ del Hº sometido a tracción es semejante a la curva de compresión y su módulo de elasticidad inicial también es aproximadamente igual al de compresión.

El valor del módulo de elasticidad inicial “ E_b ” se utiliza para el cálculo de estructuras de HºAº en tres casos particulares: para determinar flechas o deformaciones; para determinar incógnitas hiper- estáticas y para calcular pandeo.

Otro valor que interesa conocer para determinar la deformabilidad de las estructuras, es el coeficiente de Poisson. Para el Hº, solicitado con cargas normales de trabajo menores $\frac{1}{2}$ de la carga de rotura, el coeficiente de Poisson varía entre 0,15 y 0,25. Recordemos que el coeficiente de Poisson ν es la relación entre la deformación específica transversal y la deformación específica longitudinal:

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l}$$

Luego, el módulo de elasticidad transversal G_b resulta igual aproximadamente a:

$$G_b = \frac{E_b}{2(1 + \nu)} \approx \frac{3}{7} E_b$$

Para concluir hacemos notar que en la práctica no hay mucha necesidad de contar con un valor demasiado exacto del módulo de elasticidad inicial ya que es más grande el error en la estimación de los otros parámetros que intervienen en las fórmulas para determinarlo.

4.2.3.- Variaciones volumétricas del hormigón endurecido

Cuando estudiamos el cemento portland dijimos que la hidratación de los silicatos origina el llamado “gel cemento” o tobermorite. Entre otras propiedades, el gel tobermorite puede absorber o perder agua sin que varíe su estructura cristalina. Esta facultad de absorber y de perder agua, por lógica también se manifiesta en el Hº, dando lugar a fenómenos de hinchamiento y contracción del mismo. Ambos aspectos se engloban en la expresión: “variaciones volumétricas del Hº endurecido”



4.2.3.1.- Expansión, hinchamiento o entumecimiento del H° endurecido

Este fenómeno tiene lugar cuando el H° endurecido está expuesto continuamente bajo agua, tal como ocurre con las estructuras de los diques. En este caso el gel cemento o tobermorite absorbe agua y se expande dando lugar a un aumento de volumen de la masa de H°. Este aumento de volumen también recibe los nombres de “expansión”, “hinchamiento” o “entumecimiento”. El fenómeno de expansión en estructuras con deformaciones restringidas por los vínculos, origina tensiones de compresión en la masa del material, las que son soportadas muy bien por el mismo sin ningún inconveniente.

Los investigadores han determinado que un H° de 300 Kg/m³ de cemento portland, sumergido bajo agua, experimenta entre 6 y 12 meses después del colado, un entumecimiento que varía entre 0,10 y 0,15 mm por metro de longitud.

El fenómeno de expansión tiene menor importancia técnica que el fenómeno de contracción que pasamos a tratar en el apartado siguiente.

4.2.3.2 Contracción por secado o retracción del H° endurecido

Se trata de una disminución de volumen de la mezcla endurecida provocada por el desecamiento del gel tobermorite. Estas variaciones volumétricas se expresan como variaciones lineales y cuando ocurren, originan tensiones de tracción en el H°. El fenómeno tiene lugar en elementos estructurales de poca y de mucha antigüedad y origina agrietamientos en zonas en donde los movimientos están restringidos.

- Diversos factores contribuyen a aumentar la retracción, saber:
- Finura del cemento portland: a mayor finura, mayor retracción
- Cantidad de pasta en el H°: a mayor cantidad de pasta, mayor retracción.
- Relación agua/cemento: a mayor valor de esta relación, mayor retracción.
- Presencia de finos (arcillas) recubriendo el árido. A menor adherencia, mayor retracción
- Clase de agregado: agregados de alta absorción poseen retracción propia.
- Deficiencia de contenido de yeso en el clinker aumenta la retracción.
- Humedad relativa del medio ambiente: a menor humedad relativa, mayor retracción.
- Porosidad del H°: a mayor porosidad y poros más grandes, mayor retracción pues no retiene el agua

La velocidad de la retracción disminuye con el tiempo. Llamando “r” a la contracción final al cabo de 20 años, se tiene:

15% al 30% de “r” ocurre en 15 días

40% al 80% de “r” ocurre en 3 meses

60% al 85% de “r” ocurre en 1 año.

El curado prolongado bajo agua del H°, retrasa la contracción pero la influencia en la magnitud final de la misma es baja.

Los agregados pétreos constituyen la influencia más importante en la retracción pues restringen la cantidad que podría ocurrir realmente.



La magnitud de la contracción según la relación agua/cemento y el porcentaje de agregados presentes en la mezcla, puede llegar a 1,6 mm/m valor bastante superior al de entumecimiento visto en el apartado anterior. Esta magnitud induce al agrietamiento de los elementos estructurales con restricción de vínculos. La magnitud del agrietamiento depende, además de la magnitud de la contracción, de la extensibilidad del H°; de la resistencia del H° y del grado de restricción del elemento estructural. Un caso típico en la práctica lo constituye el hormigonado de losas de pavimentos. El proceso productivo da lugar al hormigonado de varias decenas de metros lineales de losa por día. A partir del momento en que se produce el desecamiento del H°, el mismo comienza a contraerse. Es necesario aserrar las losas a las 24 horas o antes, a fin de conducir las fisuras que seguramente producirá la contracción.

4.2.4.- Fluencia del hormigón endurecido

Se define como fluencia lenta o creep a un aumento de deformación causada por una carga constante. Si en un momento dado, la carga cesa, hay una recuperación elástica de la deformación pero el retorno no es completo. El efecto de la contracción aumenta la magnitud de la fluencia. La fluencia afecta las deformaciones y distribución de los esfuerzos en las estructuras.

El curado del H° durante su vida útil afecta notoriamente la magnitud de la fluencia. Por ejemplo, en el gráfico de la **Fig. N° 19** se observa que un H° curado húmedo durante los primeros 28 días y luego dejado al aire con una humedad relativa del 50%, experimenta al cabo de 20 años un acortamiento por fluencia de 1,1 mm/m. En cambio, si se lo mantiene sumergido bajo agua durante el mismo lapso, el acortamiento por fluencia se reduce a 0,4 mm/m.

La pasta de cemento es la que sufre fluencia. Los agregados pétreos desempeñan funciones restrictivas. Luego, la fluencia es función del volumen de pasta que posea el H°. Por otra parte el tipo de agregado empleado afecta a la fluencia. A mayor módulo elástico de la roca constituyente del agregado, menor resulta la magnitud de la fluencia.

La magnitud de la fluencia aumenta al incrementarse la carga. A tal punto ocurre que para un valor de la carga del orden del 80% al 90% de la carga de rotura, la pieza falla por fluencia. Entonces la falla por fluencia ocurre para la siguiente relación:

$$\frac{\text{Carga Aplicada}}{\text{Resistencia del H}^\circ} = 0,8 \text{ a } 0,9$$

La fluencia es inversamente proporcional a la resistencia del H° en el momento de aplicación de la carga. Por otra parte, tipos de cementos, relación agua/cemento, edad del H°, etc., influyen en la fluencia en la medida en que influyen en la resistencia del H°. Un factor externo muy importante es la humedad relativa del aire que rodea al H°. A menor % Hr, mayor magnitud de la fluencia.

4.2.5.- Propiedades térmicas del hormigón endurecido

Para el diseño de las secciones de H°, en los casos en donde interese conocer el “aislamiento térmico” o “la distribución potencial de temperaturas en la masa del H°” o los “esfuerzos inducidos por variación térmica de la masa de H°”, etc., se necesita conocer algunas



propiedades básicas desde el punto de vista térmico del H°. Entre tales propiedades se destacan:

- Conductividad térmica
- Difusividad térmica
- Calor específico
- Coeficiente de dilatación térmica

4.2.5.1.- Conductividad térmica del hormigón endurecido

Representa la capacidad que tiene el H° para conducir el calor. Se define como la velocidad del flujo de calor a través de un espesor unitario, sobre un área unitaria, de los materiales sometidos a una diferencia de temperatura unitaria entre las dos caras paralelas. También se puede definir como la cantidad de calor que atraviesa una superficie de 1 cm² de un cuerpo durante un período de 1 segundo, cuando existe una diferencia de temperatura de 1 °C entre esta superficie y otra que está a 1 cm de distancia de ella. La conductividad térmica se expresa en: cal/cm x °C x s

La determinación de la conductividad térmica se realiza introduciendo calor en el orificio central de una probeta cilíndrica, manteniendo su superficie externa a una temperatura más baja, generando de esta manera, un flujo de calor a través del H°.

El valor de la conductividad térmica depende principalmente de la composición mineralógica de los agregados. De modo que agregados de origen volcánico proporcionan valores bajos. En cambio, agregados con altos contenido de cuarzo, presentan elevada conductividad. Por otra parte, a menor contenido de agua de mezclado, mayor conductividad térmica y a mayor densidad de los agregados, menor valor de la conductividad.

Valores de la conductividad térmica oscilan entre $3,3 \times 10^{-3}$ a $8,6 \times 10^{-3}$ cal/cm x s x °C, valores que expresados en el sistema legal de unidades equivalen a: 1,4 a 3,6 J / m x s x °K

4.2.5.2.- Difusividad térmica del hormigón endurecido

Es la propiedad que expresa la capacidad de difusión del calor en todas direcciones e indica la facilidad con la cual el H° sufrirá variaciones de temperatura. Dicho de otra manera, representa la velocidad con que ocurren variaciones de temperatura en el interior de la masa del H°.

Analíticamente, la difusividad se expresa como la relación entre la conductividad y el producto del calor específico por la densidad:

$$h^2 \text{ [m}^2\text{/h]} = \frac{k}{c \times \gamma}$$

en donde:

h^2 : es la difusividad térmica expresada en m²/hora

k: es la conductividad térmica expresada en Kcal / m x h x °C

c: es el calor específico expresado en Kcal / kg x °C

γ : es la densidad en kg/m³



El método de determinación de la difusividad fue desarrollado por el U.S. Bureau of Reclamation. Consiste en establecer la curva de enfriamiento de una probeta entre la temperatura de calentamiento y el baño de enfriamiento. La probeta posee un orificio central en donde se introduce un termómetro de cuarzo. La probeta se calienta hasta 60 °C y luego se enfría en un baño de agua fría a $+4\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

La difusividad térmica se emplea para:

Estimación de la evolución de la temperatura del H°

Estimación de las pérdidas de calor (enfriamiento)

Estimación del tiempo de enfriamiento

Refrigeración artificial del H° a través de conductos embutidos en su masa

Entre los factores que influyen en la difusividad, mencionamos los siguientes:

Varía con la composición mineralógica de los agregados pétreos

Aumenta con el tamaño máximo y el volumen del agregado

Aumenta con la reducción de la relación agua/cemento

Disminuye con el empleo de materiales aislantes

Valores típicos de la difusividad varían entre: 0,002 y 0,007 m² / h (0,05 y 0,17 m² / día)

4.2.5.3.- Calor específico del hormigón endurecido

Es una de las propiedades que tiene que ver con el almacenamiento de calor. Se define como la cantidad de calor que se debe entregar a la unidad de masa de un material (en este caso H°) para elevar su temperatura en 1 °C.

Para determinar el calor específico se emplea un calorímetro y un termómetro de precisión. El calorímetro consiste en dos recipientes, uno interno que contiene la probeta y el agua en donde se sumerge la misma y otro externo que mantiene el aislamiento para minimizar las pérdidas de calor.

La probeta de H°, previamente pesada, se sumerge en agua destilada. Mediante un agitador se hace circular el agua en torno de la probeta hasta que la velocidad de variación de la temperatura sea constante. Se conecta luego un calentador eléctrico de inmersión durante 60 minutos para elevar la temperatura del agua y de la probeta. La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la probeta, del agua y de las partes internas del calorímetro, se miden a través de un vatímetro. De este modo el calor específico del H° es igual al total de calor cedido menos el calor necesario para elevar la temperatura del agua y del calorímetro, menos la pérdida de calor del calorímetro, dividido por el producto del salto térmico por la masa de la probeta.

Para el estudio de las pérdidas del calorímetro se emplea una probeta patrón de aluminio que posee un valor de calor específico estable con la temperatura.

El calor específico del H°, preparado con agregados normales varía entre 0,2 cal /g x °C y 0,25 cal / g x °C



4.2.5.4.- Coeficiente de dilatación térmica del hormigón endurecido

El coeficiente de dilatación térmica “ α ” se define como la variación lineal de una longitud unitaria, causada por una variación unitaria de temperatura. Se expresa en términos de deformación específica por °C.

Para determinar el valor de α , se utilizan probetas cilíndricas que cumplan con la doble condición de poseer una esbeltez $h/\phi = 2$ y diámetro $\geq 3 D_{\text{máx}}$ del agregado grueso. La medición de deformaciones se realiza mediante extensómetros eléctricos embutidos en la probeta o adosados en la superficie de la misma. Primero se estabiliza la longitud y la temperatura de la probeta en $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Luego se la lleva a $38 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Al finalizar este período se miden temperatura y deformación. Posteriormente se vuelve a estabilizar en $23 \pm 2^\circ\text{C}$ para ser posteriormente enfriada a $4 \pm 2^\circ\text{C}$, repitiéndose el proceso de lecturas. De esta manera se obtiene el coeficiente α para distintas temperaturas de ensayo. Las edades del H°, adoptadas para el ensayo son: 7, 28, 90, 180 y 365 días.

El coeficiente de dilatación térmica del H° depende principalmente de la composición mineralógica de los agregados y del contenido de pasta del mismo. La pasta de cemento endurecida posee un coeficiente de dilatación lineal mayor al de los áridos.

Valores típicos de α H° varían entre $7 \times 10^{-6} \text{ } 1 / ^\circ\text{C}$ a $14 \times 10^{-6} \text{ } 1 / ^\circ\text{C}$. Recordemos que este valor es del mismo orden que el coeficiente de variación lineal del acero, circunstancia que hace posible la existencia del H° A°.

BIBLIOGRAFIA

- 1) PRONTUARIO DEL HORMIGON, Alfred Hummel.
- 2) TECNOLOGIA DEL CONCRETO, Adams Neville.
- 3) CURSO DE HORMIGON ARMADO, Oreste Moretto.
- 4) PROPIEDADES DEL HORMIGON MASIVO, Carlos Fava.