

APUNTE ELABORADO POR LA CÁTEDRA

CONSTRUCCIONES 2

Titular: Ing. Rudy O. Grether

PLAN DE ESTUDIOS 2007

UNIDAD N° 5

"MORTEROS Y HORMIGONES"

MORTEROS Y HORMIGONES

Ventajas en el empleo del hormigón en la construcción

El hormigón de cemento portland es el material manufacturado más ampliamente utilizado, y por sus características propias (elaboración in-situ, uso de materiales locales, métodos simples de manufactura, variaciones inevitables de las características de sus componente), plantea la necesidad de un mayor conocimiento en cuanto a su estructura, sus materiales componentes y a sus propiedades mecánicas y durables. Posee adecuadas propiedades a bajo costo, combinadas con beneficios en ahorro de energía y ecológicos. A excepción del agua, el hombre no consume otro material tanto como el hormigón. En muchos países la relación entre el consumo del hormigón al acero es de 10 a 1. El acero se fabrica en condiciones cuidadosamente controladas, sus propiedades se determinan en un laboratorio y se describen en el certificado del fabricante. Por lo tanto, el proyectista necesita tan sólo especificar el acero con respecto a una norma adecuada y el ingeniero supervisor se limita a verificar la efectividad de la mano de obra de las conexiones entre miembros individuales de acero.

El campo de aplicación del hormigón es muy amplio, desde pequeñas viviendas hasta centrales nucleares, incluyendo barcos, durmientes, obras de infraestructura, estructuras off-shore, etc., es decir que el desarrollo de la civilización moderna es decididamente dependiente del hormigón. Este material presenta ventajas y desventajas que se deben evaluar en el momento de decidir el material a utilizar en una obra determinada:

VENTAJAS

Durable
Resistente
Económico
Ecológico
Moldeable – Versátil
Propiedades estéticas
Resistente al fuego
Fabricación in situ

DESVENTAJAS

Baja resistencia a tracción
Baja ductilidad
Inestabilidad volumétrica
Baja relación “resistencia / peso”
No resiste el ataque ácido

Material durable

La durabilidad es la propiedad más importante de los materiales. Principalmente, el hormigón es elegido por su durabilidad frente al agua, es un material que se puede emplear en obras de almacenaje, control y transporte de agua. Elementos estructurales expuestos a la humedad, como pilotes, fundaciones, pisos, vigas, columnas, pavimentos, etc. se construyen generalmente con hormigón. El acero y la madera no son materiales resistentes a la acción del agua, por este motivo también, el hormigón resulta competitivo.

Versatilidad y propiedades estéticas

El hormigón tiene la posibilidad de realizar elementos de variadas formas y tamaños. En el estado fresco permite rellenar y moldear diferentes tipos y formas de encofrados y moldes. Horas después, los encofrados pueden ser removidos para su reutilización, cuando el hormigón se ha solidificado y endurecido. Las formas, colores y texturas diferentes son elementos que permiten una amplia gama de posibilidades en el orden estético de las construcciones.

Material económico

La economía del empleo del hormigón en la construcción se basa en los siguientes aspectos:

- Empleo en su elaboración de materias primas generalmente abundantes.
- Menor cantidad de energía para su fabricación.
- Empleo de mano de obra no altamente calificada.
- Estructuras que necesitan poco mantenimiento.
- Es más económico que otros materiales, p.e. el acero.

Material ecológico

Los desechos o subproductos industriales representan un problema de contaminación ambiental. El hormigón y especialmente, el cemento permiten emplear en su fabricación subproductos, tales como cenizas volantes, escorias, en volúmenes no despreciables. Además, el hormigón se emplea para almacenar residuos contaminantes.

Historia del cemento y el hormigón

A modo de ejemplo se presenta hechos importantes en la historia del hormigón y el cemento:

12.000.000 AC Reacciones entre la caliza y aceite de esquistos durante la combustión espontánea ocurrida en Israel para formar un depósito natural de compuestos de cemento.

3000 AC Los Egipcios usaron barro mezclado con paja para unir ladrillos secos. También ayudaron al descubrimiento del mortero a la cal y de yeso como una agente ligante para la construcción de las Pirámides.

3000 AC Se usaron materiales cementicios para unir al bambú en los botes y el la Gran Muralla.

300 AC Los Romanos emplearon caliza en escamas con una ceniza volcánica denominada puzolana, encontrada cerca de Pozzuoli en la bahía de Nápoles. Emplearon caliza como un material cementicio. Pliny informó acerca de una mezcla de mortero de 1 parte de caliza con 4 partes de arena. Vitruvio informó una de 2 partes de puzolana con 1 parte de caliza. Se emplearon grasa animal, leche, y sangre como aditivos.

Aquí aparece el vocablo CEMENTO, que proviene del latín CAEMENTUM, que es una contracción de CAEDIMENTUM, que a su vez se relaciona con CAEDERE, que significa CORTAR, DIVIDIR.

CAEMENTUM era un conjunto de fragmentos de piedra, de mármol, rocas y otros materiales, obtenidos por CORTE o DIVISION. Al mezclarlos con cal y puzolana, se producía su solidificación, digna de ser admirada, según dice Vitruvio, "efficit res admirandas". A este conjunto ya endurecido se lo seguía llamando "CAEMENTUM" (como si se dijera cascajo) aún cuando era una parte de la unidad total y no era el ligante, que fue siempre la puzolana.

Existe también una especie de polvo que por su naturaleza produce cosas dignas de ser admiradas. Se produce en las regiones de Buias, en los campos de los municipios que están alrededor del Monte Vesubio; el cual polvo, mezclado con cal y cascajo(piedra partida), no sólo da firmeza a todo edificio, sino que también cuando se erigen moles en el mar, endurecen bajo el agua.

Del mismo modo que, siglos más tarde a la adición de materiales obtenida por acción mecánica dentro de un recipiente llamado "mortero", se le llamaría "mortero".

193 AC I Aemelia PorticuHouse hecho de huesos ligados para formar hormigón.

200 DC El Panteón Romano.

1678 Joseph Moron escribió acerca del fuego escondido en la cal calcinada que aparece luego del agregado de agua.

1756 John Smeaton, Ingeniero inglés, redescubrió el cemento hidráulico a través de los ensayos repetidos del mortero en agua salada y agua corriente.

1796 James Parker de Inglaterra patentó un cemento hidráulico natural, calcinando nódulos de caliza impura que contenía arcilla, llamado Cemento Parker o Cemento Romano.

1812-1813 Louis Vicat, de Francia, preparó cal hidráulica artificial calcinando mezclas sintéticas de caliza y arcilla.

1850 Jean – Louis Lambot fue el primero en emplear armaduras en los botes.

1850-1880 Francois Coignet, un constructor francés, es el responsable del primer uso amplio del hormigón en edificios.

1887 Henri Le Chatelier, de Francia, estableció las relaciones entre los óxidos para preparar la cantidad adecuada de cal para producir cemento portland. Denominó a los componentes: Alita(silicato tricálcico), Belita(silicato dicálcico), y Celita (aluminatoferrito tetracálcico). Propuso que el endurecimiento es causado por la formación de los productos cristalinos de la reacción entre el cemento y el agua.

- 1902** Thomas Edison fue el pionero en el ulterior desarrollo del horno rotatorio.
- 1927** Eugene Freyssinet desarrolla exitosamente el hormigón pretensado.
- 1930** Eduardo Torroja, diseña en primer techo de cáscara delgado en Algeciras.
- 1931** Le Corbusier construye la Villa Savoya.
- 1935** Se construyen las primeras represas importantes de hormigón, Hoover Dam y Grand Coulee Dam.
- 1940** Los Construction Technology Laboratories perfeccionan el hormigón con aire incorporado.
- 1956** Se construye el Museo Guggenheim con hormigón reforzado.
- 1961** Le Corbusier construye el complejo gubernamental en Chandigara, India. Las Torres Gemelas de Bertrand Goldberg en Marina City marcaron el comienzo del empleo del hormigón reforzado en modernos rascacielos y fijaron el récord de 180 m de altura. Se emplea por primera vez hormigón de 40 MPa en las columnas más bajas. Primer estructura de deportes en hormigón en forma de domo. Lake Point Towers, 70 pisos, 200m de altura, hormigón de 50 MPa.
- 1970** Se introduce el refuerzo con fibras en el hormigón.
- 1975** Water Tower Place, 265m de altura, hormigón de 60 MPa, empleando superplastificantes.
- 1985** El hormigón de la mayor resistencia se usó en el edificio de Union Plaza en Seattle, Washington.
- 1989** Scotia Plaza Building, Toronto, 280 m de altura.
- 1989** Two Prudential Plaza, en Chicago, de 280 m de altura.
- 1996** Petronas Twin Towers, 450 m de altura.

Materiales constitutivos

El hormigón es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, etc.), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua.

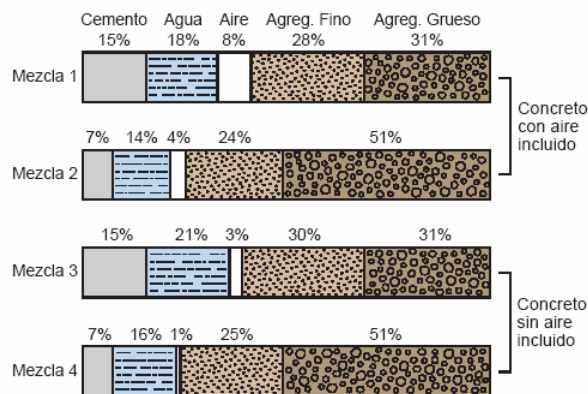
Otros materiales cementantes (cementicios, cementosos) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta.

Generalmente los agregados (áridos) se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 4.78 mm; agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla de 4.78 mm y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm (3/4 pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm (3/8 pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado).

La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del hormigón. En la figura se muestra que el volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del hormigón, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del hormigón. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta.



Variación de las proporciones usadas en el hormigón, en volumen absoluto. Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.

La calidad del hormigón depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un hormigón adecuadamente confeccionado, cada y toda partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta, como se enseña en la figura.

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del hormigón endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento. Cuando grandes cantidades de agua son innecesariamente empleadas, ellas diluyen la pasta de cemento (la cola o pegamento del hormigón). Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

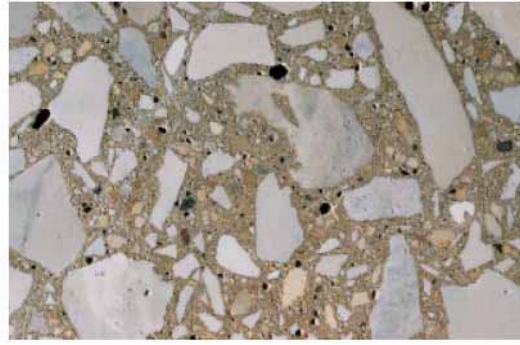
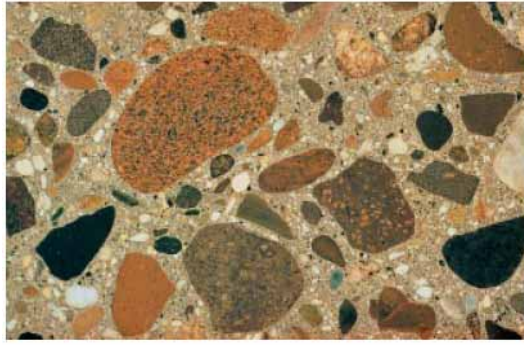
- Aumento de la resistencia a la compresión (resistencia en compresión) y de la resistencia a flexión
- Disminución de la permeabilidad, entonces disminución de la absorción y de la permeabilidad
- Aumento de la resistencia a la intemperie
- Mejor unión entre hormigón y armadura
- Reducción de la contracción y de la fisuración (agrietamiento, fisuramiento)
- Menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado

Cuanto menos agua se usa, mejor es la calidad del hormigón, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente.

Menores cantidades de agua de mezcla (mezclado) resultan en mezclas más rígidas (secas); pero, con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejoría de la calidad del hormigón.

Tanto las propiedades del hormigón fresco (plástico) como del hormigón endurecido se pueden cambiar con la adición al hormigón de aditivos químicos, normalmente en la forma líquida, durante la dosificación. Los aditivos químicos comúnmente se emplean para (1) el ajuste del tiempo de fraguado o de endurecimiento, (2) la reducción de la demanda de agua, (3) el aumento de la trabajabilidad (manejabilidad, docilidad), (4) la inclusión intencional de aire y (5) el ajuste de otras propiedades del hormigón fresco o endurecido.

Después de terminar el proporcionamiento, dosificación, colocación (hormigonado, puesta, colado), consolidación, acabamiento (terminación, acabado) y curado adecuados, el hormigón se endurece, se transforma en un material no-combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable lo cual requiere poca o ninguna conservación (mantenimiento). Además, el hormigón es un excelente material de construcción porque se lo puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en un número ilimitado de aplicaciones.



Sección transversal del hormigón endurecido, confeccionado con grava redondeada de sílice (izquierda) y calcáreo (derecha). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena los espacios entre las partículas.

Proceso tecnológico de fabricación del hormigón

El transporte, colocación, compactación, protección y curado, se realizará en forma tal que una vez retirados los encofrados se obtengan estructuras compactas, de aspecto y textura uniformes, resistentes, impermeables, seguras y durables, y en un todo de acuerdo a las necesidades del tipo de estructura y a los requisitos especificados en el CIRSOC 201.

Se analizarán las características de cada una de las etapas de la ejecución del hormigón, de acuerdo con el siguiente orden:

- 1) Acopio de materiales
- 2) Transporte hasta la planta de dosificación
- 3) Dosificación
- 4) Mezclado
- 5) Transporte de la mezcla fresca
- 6) Colocación
- 7) Compactación
- 8) Curado

Acopio de los materiales

Debe preverse por anticipado la superficie necesaria para el depósito de los diferentes componentes de la mezcla.

En grandes obras se destinan distintos sectores a los agregados de diferentes orígenes y granulometrías (por ejemplo arenas de 2 tipos y agregados gruesos naturales o triturados de distintos tamaños). En el caso en que se prevea la provisión de agregados de distintos orígenes deberán reservarse a su vez espacios separados para no mezclar, por ejemplo, arena natural con triturada o piedra partida con canto rodado. No es aconsejable formar pilas piramidales o cónicas de gran altura, porque provocan segregación de los materiales; aquí se produce un compromiso superficie/altura, pues a menor altura, mayor superficie ocupada. Los lugares de acopio deben ser planos, de superficie firme y bien drenada.

El cemento es un material sensible a la humedad, si se mantiene seco, va a retener su calidad indefinidamente. El cemento almacenado en contacto con el aire húmedo o humedad fragua lentamente y tiene menos resistencia que un cemento mantenido seco.

El cemento en la actualidad tiende a ser transportado a granel, en recipientes llenados y vaciados con aire comprimido; debe tenerse la precaución de asegurar en caso de usar cemento en silos, que no se mezclen distintas partidas, cada silo debe usarse con el cemento proveniente de una partida hasta que se termine.

No se deberían almacenar bolsas de cemento en pisos húmedos, sino colocarlos sobre pallets o tarimas, apiladas juntas para reducir la circulación de aire, pero no cercana a los muros exteriores. En caso que las bolsas deban ser mantenidas en acopio durante un largo tiempo se deberían cubrir con películas impermeables.

Dosificación

En el caso de los hormigones, el conocimiento de la dosificación es fundamental para los proyectistas y directores de obras: permite a los primeros especificar la clase de hormigón para que sus propiedades, tales

como la resistencia a los esfuerzos, durabilidad, etc. respondan a las condiciones de los proyectos o de los reglamentos; y a los segundos con los materiales disponibles en obra, confeccionar hormigones que cumplan con las propiedades especificadas. En ambos casos el objetivo es la predeterminación de las propiedades de los hormigones con el más alto grado de exactitud posible.

Es decir que dosificar es, en cierta forma, pronosticar presuponiendo que mezclando ciertos materiales de características más o menos conocidas en determinadas proporciones la mezcla se comportará, tanto en el estado fresco como en el endurecido, dentro de un cierto margen de error (que puede ser o no tolerable), de acuerdo con las condiciones prefijadas.

Podemos separar los métodos utilizados para dosificar hormigones en 3 grandes grupos, el 1° podría denominarse empírico, el 2° semiempírico y el 3° racional.

Ubicamos en el primer grupo a los procedimientos en que los materiales componentes se proporcionan por unidades de volumen o de peso, sin estudiar ni tener en cuenta las características de los materiales componentes. Esta forma de dosificar sólo son justificables en obras de muy pequeña importancia en la que se prevean muy bajas tensiones de trabajo para el hormigón.

Damos la denominación de semiempíricas a las dosificaciones en que se fija la relación agua/cemento en peso mientras que los agregados se proporcionan mediante tanteos sucesivos utilizando pastones de prueba, variando las cantidades de aquellos para una cantidad fija de pasta cementicia, hasta conseguir la trabajabilidad y consistencia adecuada.

En tercer término ubicamos a las dosificaciones denominadas racionales, sólo por razones de nomenclatura ya que se basan también en datos empíricos, en las que además de fijar la relación agua /cemento en peso, se determinan los contenidos óptimos de cada uno de los componentes en base al estudio de las características físicas de los agregados.

Los sistemas más evolucionados consisten en una serie de tolvas en cuya parte inferior hay recipientes que pueden llenarse mediante compuertas gobernables desde un comando, en los sistemas manuales el operador, mediante palancas cierra o abre las compuertas, hasta lograr que las cantidades de materiales que entren en los baldes sean las correspondientes a las indicadas por el estudio de dosificación; esto se determina observando las lecturas de los cuadrantes de básculas vinculados con estos baldes.

En los sistemas automáticos, basta fijar las cantidades en un tablero, para que los recipientes se llenen en las cantidades especificadas.

Mezclado del hormigón

Todo hormigón se debe mezclar completamente hasta que tenga una apariencia uniforme, con todos sus ingredientes igualmente distribuidos. El objeto del mezclado es la de cubrir la superficie de todas las partículas de agregado con pasta de cemento, hacer una masa uniforme. Esta uniformidad no debe perturbarse en el proceso de descarga.

El mezclado del hormigón a mano es caro en mano de obra y en tiempo. El reglamento CIRSOC 201 admite este procedimiento solo en casos excepcionales, para pequeños volúmenes de hormigón de resistencia menor de 80 kg/cm^2 , o para completar el moldeo de un elemento estructural en caso de desperfecto de la hormigonera.

Las mezcladoras no se deben cargar más que sus capacidades y se deben operar en la velocidad de mezclado recomendada por el fabricante. Se puede aumentar la producción con el uso de mezcladoras mayores o con mezcladoras adicionales, pero no a través del aumento de la velocidad de mezclado o de la sobrecarga del equipo con el cual se cuenta. Si las palas (aspas o paletas) de la mezcladora se desgastan o se recubren con hormigón endurecido, el mezclado va a ser menos eficiente. Estas condiciones se deben corregir.

Mezclado Estacionario

El hormigón a veces se mezcla en la obra a través de una mezcladora estacionaria. Las mezcladoras estacionarias incluyen tanto las mezcladoras en obra como las mezcladoras en plantas de hormigón elaborado. Están disponibles en volúmenes de hasta 9 m^3 y pueden ser del tipo basculante o fijo o del tipo de pala rotatoria con abertura superior o del tipo paleta. Todos los tipos pueden estar equipados con palas de carga y algunos son equipados con un canalón de descarga giratorio. Muchas mezcladoras estacionarias tienen dispositivos para medir el tiempo y algunos se pueden regular para que no se pueda descargar la mezcla sino hasta que haya transcurrido el tiempo designado.

Este tiempo varía con el tipo de mezcladora utilizada. En el sentido estricto, no es el tiempo de mezclado,

sino el número de revoluciones de la mezcladora, el que marca el criterio para lograr un mezclado adecuado. Generalmente con veinte revoluciones resulta suficiente.

No pueden darse reglas generales sobre el orden de ingreso de los materiales a la mezcladora, por que dependen de las propiedades, tanto de la mezcla como de la mezcladora. Generalmente, se coloca al principio una pequeña cantidad de agua (hasta un 10% del agua de mezclado) seguida de todos los materiales sólidos, que de ser posible se deben agregar en forma uniforme y simultánea. Es aconsejable que la mayor parte del agua se agregue al mismo tiempo, dejando el resto para después de efectuada la mezcla de los materiales sólidos. Cuando se emplean pequeñas mezcladoras, es conveniente alimentarlas primero con el agregado fino, parte del grueso y el cemento. Después, el agua y finalmente el resto del agregado grueso para que rompa los posibles grumos que se han formado.

Si se utilizan aditivos retardadores o reductores de agua, se los debe adicionar siempre en la misma secuencia en el ciclo de carga. De otra manera, pueden ocurrir grandes variaciones en el tiempo de fraguado o en el porcentaje de aire incluido (incorporado). La adición del aditivo debe completarse dentro del primer minuto después de la adición completa del agua al cemento o antes del inicio de los últimos $\frac{3}{4}$ del ciclo de mezclado, cualquiera que ocurra primero. Si se emplean dos o más aditivos en la misma mezcla de hormigón, deben ser adicionados separadamente.

Hormigón Elaborado

El hormigón elaborado se dosifica y se mezcla fuera de la obra y se entrega en la construcción en el estado fresco. Se puede producir por uno de los siguientes métodos:

1. El hormigón se mezcla completamente en la mezcladora estacionaria en la planta y se lo entrega en un camión agitador, en un camión mezclador operando en la velocidad de agitación o en un camión no agitador.
2. El hormigón se mezcla parcialmente en la mezcladora estacionaria y el mezclado se completa en el camión mezclador.
3. El hormigón mezclado en el camión se mezcla completamente en el camión mezclador.

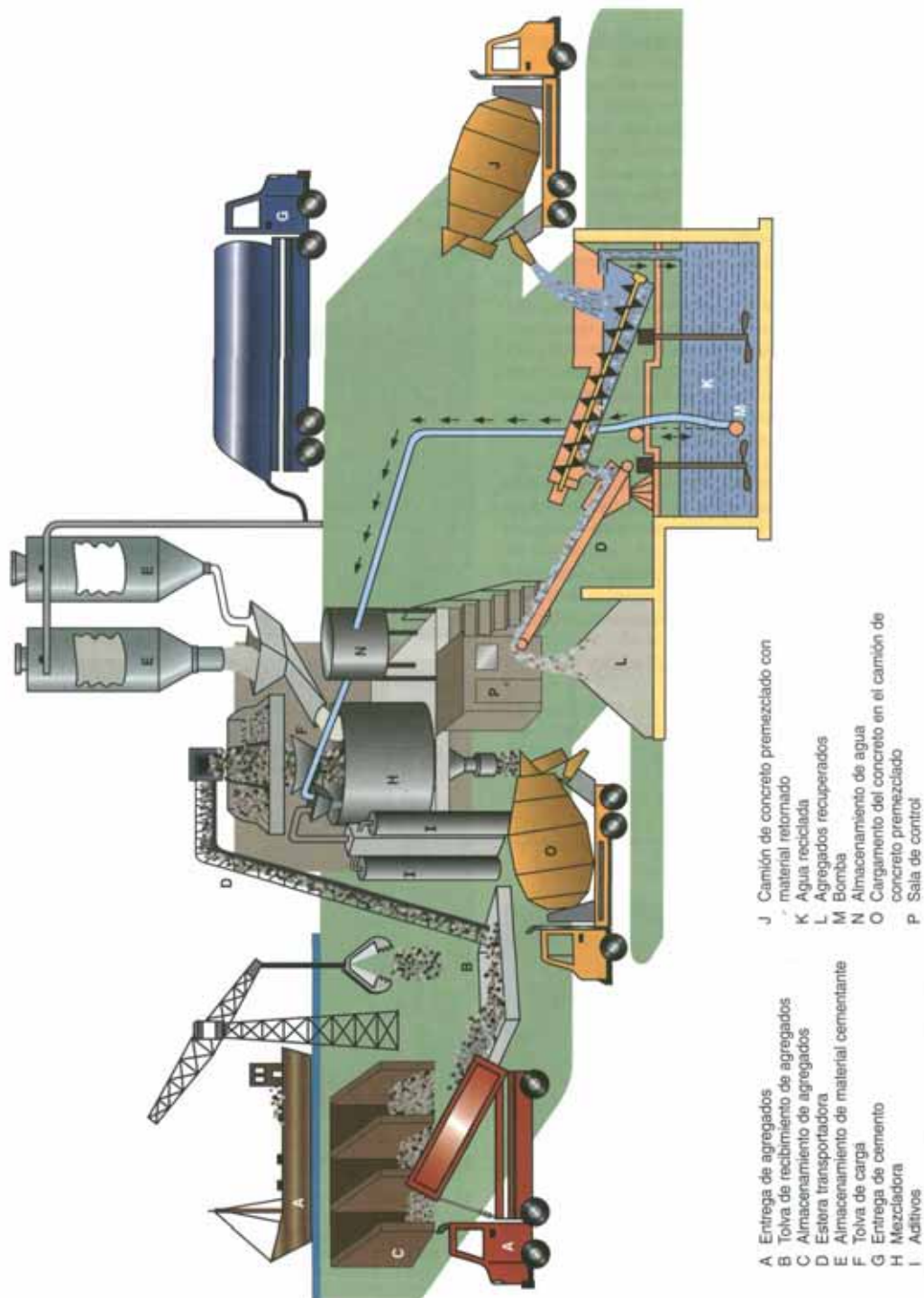
Cuando se emplea un camión mezclador para el mezclado completo, normalmente se requieren de 70 a 100 revoluciones del tambor y de las palas en la tasa de rotación designada por fabricante como velocidad de mezclado para producir hormigón con la uniformidad deseada. Después de 100 revoluciones, éstas se deben realizar a una tasa de rotación designada por el fabricante como velocidad de agitación. La velocidad de agitación es normalmente de 2 a 6 rpm y la velocidad de mezclado de 6 a 18 rpm. El mezclado con velocidades elevadas por periodos prolongados de más de 1 hora, puede resultar en pérdida de resistencia, incremento de la temperatura, pérdida excesiva del aire incorporado y pérdida acelerada del asentamiento del hormigón.

Cuando se usan camiones mezcladores, se limita el tiempo entre mezclado y descarga completa del hormigón en la obra a 1 $\frac{1}{2}$ hora o antes que el camión haya logrado 300 revoluciones después de la adición del agua al cemento y agregados, o de introducir el cemento a los agregados. Los mezcladores y agitadores se deben siempre operar dentro de los límites de volumen y velocidad de rotación designados por el fabricante del equipo.

Transporte y manejo del hormigón

Los medios empleados para el transporte del hormigón son variadísimos y pueden consistir en carros, volquetes, baldes con fondo provistos de compuerta, bombas, cintas transportadoras, camiones volcadores, camiones agitadores, etc. Las condiciones a cumplir por el transporte son las siguientes:

- a) no producir segregación
- b) evitar evaporación
- c) tiempo mínimo, para que no comience el fraguado.



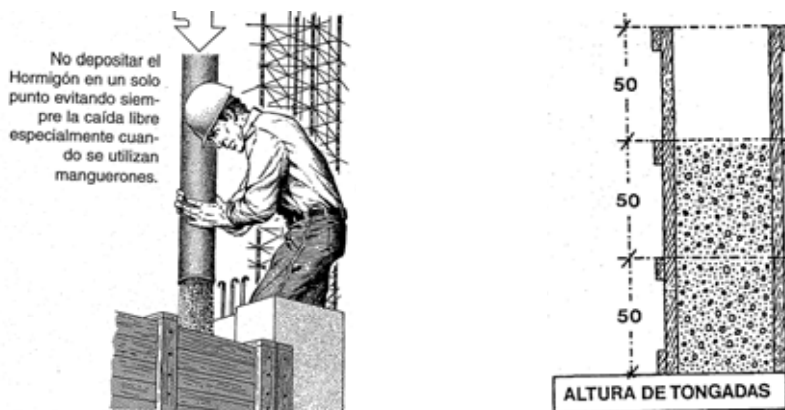
Esquema de planta elaboradora de hormigón (PCA)

Colocación del hormigón

El hormigón se debe depositar en forma continua lo más cerca posible de su posición final sin segregación. En la construcción de losas, la colocación debe empezar a lo largo del perímetro en un extremo del trabajo, descargando cada amasada contra el hormigón colocado anteriormente. No se debe verter el hormigón en pilas separadas para luego nivelarlo y trabajarlo simultáneamente, ni tampoco se debe colocar el hormigón en pilas grandes y moverlo horizontalmente para su posición final. Tales prácticas resultan en segregación, pues el mortero tiende a fluir adelante del material grueso.

En general, se debe colocar el hormigón en muros, losas espesas o cimentaciones en capas horizontales de espesor uniforme y cada capa se debe consolidar totalmente antes de la colocación de la próxima capa. La velocidad de colocación debe ser suficientemente rápida para que el hormigón colocado previamente no haya fraguado cuando se coloque la capa siguiente sobre él. Las capas deben tener un espesor de 150 mm a 500 mm en elementos reforzados y de 380 mm a 500 mm en hormigón masivo. El espesor dependerá del ancho de los encofrados y de la cantidad de armaduras.

Algunas veces, se coloca el hormigón a través de aberturas, llamadas ventanas, en los lados de los encofrados altos y estrechos. Cuando un canalón descarga directamente a través de la abertura, sin el control del flujo del hormigón en su extremidad, hay peligro de segregación. Se debe usar una tolva colectora afuera de la abertura para permitir que el hormigón fluya suavemente a través de la abertura, disminuyendo la tendencia de segregación.



Consideraciones para colocación (AAHE)

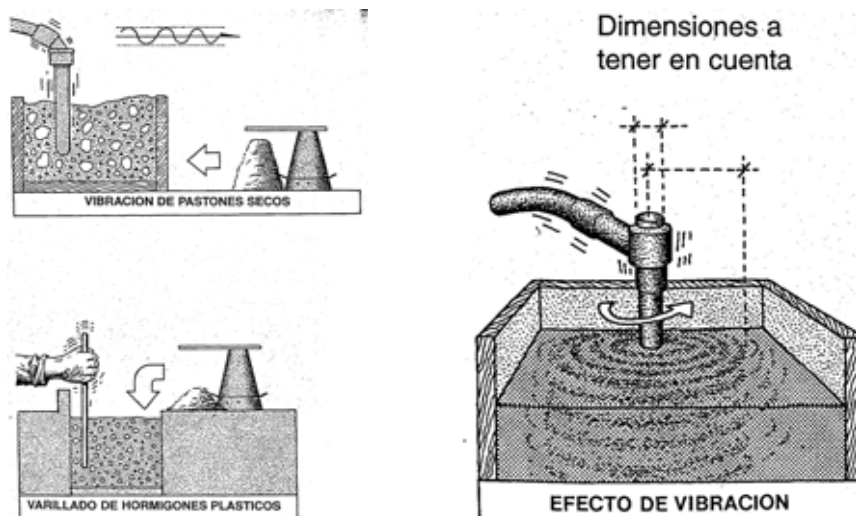
Compactación del hormigón

La consolidación es el proceso de compactación del hormigón fresco, para moldearlo dentro de los encofrados y alrededor de los elementos insertos y de las armaduras y para eliminar la concentración de piedras, agujeros y aire atrapado.

La compactación se realiza a través de métodos manuales o mecánicos. El método escogido depende de la consistencia de la mezcla y de las condiciones de colocación, tales como la complejidad de los encofrados y la cantidad y espaciamiento de las armaduras. Normalmente, los métodos mecánicos que usan vibración interna o externa son los métodos preferidos de consolidación.

Las mezclas trabajables y fluidas se pueden consolidar con varillado manual, es decir, insertando, repetidamente, en el hormigón una varilla u otra herramienta adecuada. La varilla debe ser suficientemente larga para alcanzar el fondo del encofrado o de la capa y suficientemente delgada para pasar fácilmente entre las armaduras y los encofrados.

La consolidación mecánica adecuada posibilita la colocación de mezclas poco fluidas, con baja relación agua/material cementante y alto contenido de agregado grueso, características normalmente asociadas a hormigones de alta calidad, aún en elementos densamente reforzados. Entre los métodos mecánicos están la centrifugación, usada para consolidar hormigones con asentamiento entre moderado a alto que se emplean para fabricar tubos, postes y pilotes; las mesas de golpeo o de caídas, usadas para compactar hormigones muy rígidos de bajo asentamiento que se emplean en la producción de unidades prefabricadas de hormigón arquitectónico; y la vibración interna y externa.



Consideraciones para vibración interna (AAHE)

Desencofrado

Es ventajoso dejar los encofrados en su lugar el mayor tiempo posible para continuar el periodo de curado. Sin embargo, hay veces que es necesario la remoción de los encofrados lo más pronto posible. Por ejemplo, donde se especifica un acabado frotado, los encofrados se deben remover temprano para permitir el primer frotado antes que el hormigón se vuelva muy duro. Además, el desencofrado rápido es necesario para la reutilización inmediata de los encofrados.

En cualquier caso, no se los debe remover hasta que el hormigón sea suficientemente resistente para soportar los esfuerzos de las cargas muertas (peso propio) de la estructura y cualquier carga impuesta de la construcción. El hormigón debe tener dureza suficiente para que la superficie no se dañe de ninguna manera cuando se desencofre con razonable cuidado. En general, en hormigones con temperatura superior a 10 °C, los encofrados laterales con espesor razonable de secciones apuntaladas se pueden remover después de 24 horas de la colocación del hormigón. Los encofrados de las vigas y losas de piso y sus apuntalamientos se pueden remover entre 3 y 21 días, dependiendo del tamaño del elemento y del desarrollo de la resistencia del hormigón. En la mayoría de las condiciones, es mejor confiar en la resistencia del hormigón determinada a través de ensayos de especímenes curados en la obra en vez de elegir arbitrariamente una edad para la remoción de los encofrados.

Para la remoción de los encofrados, el diseñador debe especificar los requisitos de resistencia mínima para varios elementos. La relación entre edad y resistencia se debe determinar a través de muestras representativas del hormigón usado en la estructura y curado en el campo, bajo las condiciones de obra. Sin embargo, no se debe olvidar que las resistencias se afectan por los materiales usados, temperatura y otras condiciones. Por lo tanto, el tiempo necesario para el desencofrado varía de obra en obra.

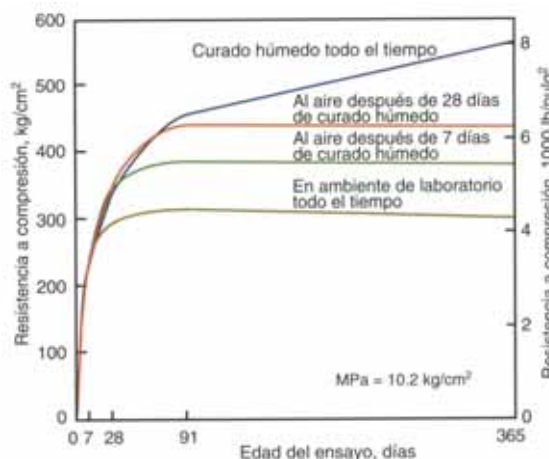
Curado del hormigón

El curado es la manutención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación y del acabado, para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el hormigón. Siempre se debe enfatizar la necesidad de curado pues tiene una fuerte influencia sobre las propiedades del hormigón endurecido, o sea, el curado adecuado hace que el hormigón tenga mayor durabilidad, resistencia, impermeabilidad y estabilidad dimensional. Las losas expuestas son especialmente sensibles al curado, pues se puede reducir significativamente el desarrollo de la resistencia mecánica y la resistencia a la congelación-deshielo en su superficie, cuando el curado no es apropiado.

Cuando el cemento portland se mezcla con el agua, empieza una reacción química, llamada de hidratación. El grado de hidratación (extensión hasta la cual la reacción se completó) tiene influencia sobre la resistencia y la durabilidad del hormigón. El hormigón recién mezclado normalmente contiene más agua que la requerida para la hidratación del cemento, sin embargo la pérdida excesiva de agua por evaporación puede disminuir o prevenir la hidratación adecuada. La superficie es particularmente susceptible a la hidratación

insuficiente porque se seca primero. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida en los primeros días después de la colocación del hormigón. Por lo tanto, es importante que se retenga agua en el hormigón durante este período, o sea, se debe evitar la evaporación o reducirla considerablemente.

Con el curado adecuado, el hormigón se vuelve más impermeable y más resistente a esfuerzos, a abrasión y a congelación-deshielo. El desarrollo de las propiedades es muy rápido en los primeros días, pero después continúa más lentamente por un periodo de tiempo indefinido. La figura muestra el desarrollo de la resistencia con relación a la edad, de hormigones sujetos a diferentes períodos y temperaturas de curado, respectivamente.



Efecto del curado sobre la resistencia a compresión del hormigón (PCA)

El método de curado más eficiente depende de los materiales y métodos de construcción empleados y de la intención de uso del hormigón endurecido. En la mayoría de las obras, el curado normalmente involucra la aplicación de compuestos de curado o la cobertura del hormigón fresco con hojas impermeables o yute (arpillera, estopa) húmeda. En algunos casos, tales como en el clima caluroso y en el clima frío, se necesitan cuidados especiales y el uso de otras precauciones.

Se puede mantener el hormigón húmedo (y en algunos casos a una temperatura favorable) a través de tres métodos de curado:

1. Métodos que mantienen el agua de la mezcla presente durante los períodos iniciales de endurecimiento. Entre éstos se incluyen encharcamiento o inmersión, rociado, aspersión o niebla y coberturas saturadas de agua. Estos métodos permiten un cierto enfriamiento a través de la evaporación, que es benéfico en clima caluroso.
2. Métodos que reducen la pérdida del agua de la mezcla de la superficie del hormigón. Esto se puede hacer cubriéndose el hormigón con papel impermeable o plástico o a través de la aplicación de compuestos formadores de membrana.
3. Métodos que aceleran el desarrollo de la resistencia a través del suministro de calor y humedad adicional al hormigón. Esto se realiza normalmente con vapor directo, espirales (serpentinillas) de calentamiento o encofrados o almohadilla calentados eléctricamente.

Propiedades del hormigón fresco

El estado fresco se define como el tiempo que transcurre entre el momento que se puso en contacto el agua con el cemento hasta cuando el hormigón comienza a rigidizarse (fraguado). Muchas de las propiedades exigibles a un hormigón en estado endurecido dependen de las propiedades de este cuando se encuentra en estado fresco. Las características que debe tener una mezcla fresca dependerán de las características de la estructura a construirse y de los métodos de colocación y compactación disponibles.

A continuación se describen las principales características del estado fresco.

Uniformidad

Esta propiedad debe ser mantenida en el tambor de mezclado, durante la colocación y compactación, para lograr un hormigón de propiedades físico-mecánicas y de durabilidad sean homogéneas en toda su masa. La uniformidad se modifica por los fenómenos de segregación y exudación.

Segregación

Es la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que la distribución de tamaños de las partículas componentes deja de ser uniforme. Las diferencias en tamaño y en densidad de las partículas son las causas principales de la segregación, pero su magnitud puede disminuirse con la selección de una granulometría adecuada y un manejo cuidadoso del material. Existen dos tipos de segregación:

Segregación interna: en este caso las partículas grandes tienden a separarse, (por asentamiento o descohesión) o la pasta se separa de los agregados.

Segregación externa: las fuerzas exteriores que actúan sobre el hormigón fresco superan las fuerzas internas de cohesión. Esto ocurre durante el transporte, colocación y vibrado.

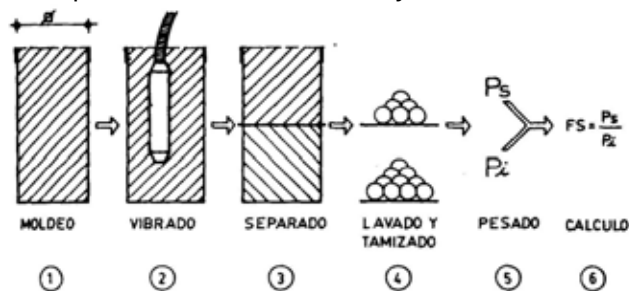
El hormigón debe colocarse directamente en su posición definitiva, sin moverlo, ni dejarlo fluir sobre los encofrados, ni aplicarle un vibrado prolongado. El vibrado se suspende cuando dejan de aparecer burbujas de aire en la superficie. En hormigones normales la segregación producirá una gran concentración de agregado grueso en la parte inferior del molde y en los hormigones livianos, será en la parte superior, debido a su tendencia a flotar. La segregación origina en la estructura puntos de muy baja resistencia, se forman zonas sin mortero denominados nidos de abeja, que permiten el ataque al hormigón y al acero, de fluidos agresivos. Así se disminuye la seguridad de la estructura y su vida útil.

Ensayos de segregación

Se utiliza un ensayo ideado por Popovics (Figura 1). Se llena un molde de altura adecuada con hormigón y el mismo es compactado. Luego, se extraen muestras del material fresco de las partes superior e inferior, en forma separada. Se determina por lavado sobre el tamiz de 4.75 mm el porcentaje de agregado grueso en las dos muestras. El factor de segregación, FS, se calcula como el cociente de los pesos de agregado grueso:

$$FS = (P_s/P_i)$$

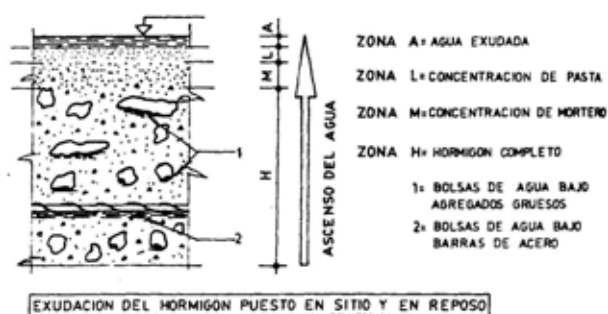
La segregación no es importante para valores de FS entre 1 y 1,1.



Esquemización del ensayo de segregación (Bascoy)

Exudación

Este mecanismo es una forma especial de segregación, donde parte del agua de amasado tiende a ascender hacia la superficie del hormigón recién colocado, por ser el componente de menor densidad de la mezcla y a la poca capacidad de la estructura granular para retenerla. Como consecuencia de la exudación la parte superior del hormigón tiene un relación a/c mayor, es porosa, débil al desgaste y al efecto de congelación. Debajo de las partículas de agregado grueso se acumula agua debilitando la interfaz "pasta-agregado". También, este efecto se produce debajo de las armaduras, disminuyendo la adherencia entre el hormigón y el acero.



Efectos de la exudación (Bascoy)

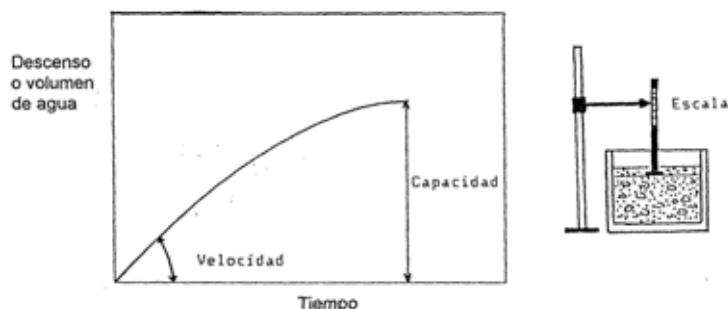
Ensayo de exudación

Se llena un molde normalizado con hormigón fresco, y se mide periódicamente el volumen de agua exudado o el descenso de un punto de la superficie de hormigón (Figura 3) y se determina los siguientes parámetros:

Velocidad de exudación: Se mide en centímetros de asentamiento o volumen de agua exudada por unidad de tiempo. La velocidad en la primera etapa de este proceso es constante.

Capacidad de exudación: Esta dada por el porcentaje de agua de mezclado que se exuda. Un valor máximo de exudación un 10%.

Tiempo de exudación: la exudación continua hasta que la pasta de cemento ha endurecido lo suficiente, o hasta que se logra un equilibrio entre las fuerzas actuantes, y el descenso del material granular finaliza. También el efecto de fondo en recipientes poco profundos, y el efecto pared en recipientes esbeltos, pueden ser la causa de la finalización de la exudación.



Ensayo de exudación (UNICEN)

La resistencia del hormigón se ve seriamente afectada por el grado de compactación por ello la consistencia de la mezcla debe permitir su transporte, colocación y terminación sin segregación y eliminar las burbujas de aire atrapado en la hormigonera.

Definición de Trabajabilidad

Es la cantidad de trabajo interno útil que se necesita para producir una compactación completa de la mezcla de hormigón. Se habla de trabajo útil porque parte de la energía se gasta en vibrar los encofrados, capas de hormigón ya compactadas o endurecidas.

Un hormigón es trabajable, según Waltz, cuando:

- es fácilmente bien mezclado con un esfuerzo razonable.
- no se produce segregación ni exudación durante el transporte, colocación y compactado.
- es correctamente compactado con los equipos disponibles.
- la exudación no produce "canales" o "nidos de abejas" significativos.

Para describir el estado fresco del hormigón se emplea el término "*consistencia*" que es la relativa movilidad o habilidad del hormigón o mortero para fluir. Los términos trabajabilidad y consistencia tienen cierto parecido pero miden distintas características. Dos hormigones de igual consistencia (igual asentamiento) pueden tener distinta trabajabilidad en el caso que uno contenga canto rodado y otro piedra partida. Este

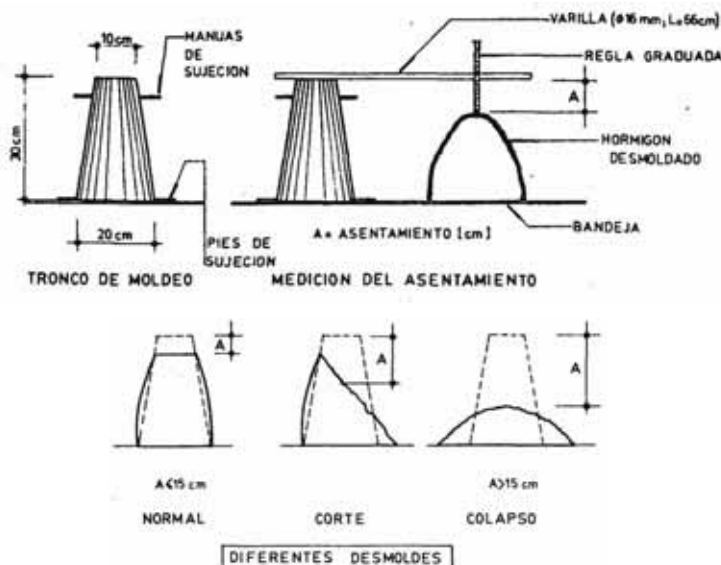
último será menos trabajable por que su forma y textura originan una mayor fricción interna, que dificulta su movilidad y compactación. También esto se cumple en el caso de hormigones con y sin aire intencionalmente incorporado. Las burbujas de aire incorporado disminuyen la fricción interna de la mezcla.

Prueba de Asentamiento (IRAM 1536: 1978)

Es conocido como el ensayo de cono de Abrams, no mide la trabajabilidad, mide la consistencia (deformabilidad) pero es útil para detectar variaciones en la uniformidad de la mezcla de proporciones nominales determinadas. El método es sensible para variaciones del contenido de agua. El rango de validez de este ensayo esta comprendido entre los 2 y 17 cm. El coeficiente de variaciones del orden del 10 %, siendo un valor normal para otros tipos de ensayos. Es aplicable a hormigones plásticos con agregados gruesos hasta tamaño nominal de 37.5 mm. En el caso de agregados de mayor tamaño, el método es aplicable cuando se realiza sobre la fracción de hormigón que pasa el tamiz IRAM 37.5 mm.

Procedimiento de Ensayo

Se llena el molde troncocónico, de 30cm de altura y de diámetros superior de 10 cm e inferior de 20 cm, en tres capas de igual volumen, con una muestra de hormigón representativa del pastón. Cada capa se compacta con 25 golpes con una varilla de acero de 16 mm de diámetro, con punta redondeada. Se enrasa y luego, se retira el molde. Se mide el asentamiento de la mezcla. Si la masa de hormigón se rompe se debe repetir el ensayo dado que la rotura puede deberse a un mal llenado o a la falta de cohesión de la mezcla.



Influencia de la temperatura y el tiempo sobre el asentamiento (Bascoy)

Aspecto, Asentamiento y Método de Compactación.

Consistencia	Rango			Ensayo de evaluación aplicable
	Remoldeo (V) (seg.)	Asentamiento (A) (cm)	Extendido (E) (cm)	
Muy seca	$5,0 < V \leq 50,0 \pm 2,0$	-----	-----	Tiempo de remoldeo en disp. VeBe
Seca	-----	$2,0 < A \leq 5,0 \pm 1,0$	-----	Asentamiento del cono de Abrams
Plástica	-----	$5,0 < A \leq 10,0 \pm 2,0$	-----	Asentamiento del cono de Abrams
Muy plástica	-----	$10,0 < A \leq 15,0 \pm 2,0$	$50 < E \leq 55 \pm 1,0$	Asentamiento del cono de Abrams Extendido en la mesa de Graf
Fluida	-----	$15,0 < A \leq 18,0 \pm 3,0 (*)$	$55 < E \leq 60 \pm 2,0$	Asentamiento del cono de Abrams Extendido en la mesa de Graf
Muy fluida	-----	-----	$60 < E \leq 65 \pm 2,0$	Extendido en la mesa de Graf

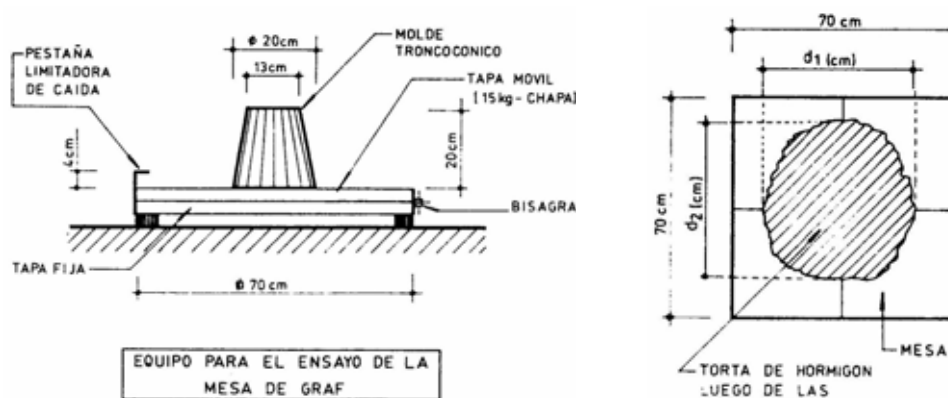
(*) La tolerancia en + es válida siempre que el asentamiento medido sea igual o menor que 20,0 cm.

Este ensayo se complementa con una observación del comportamiento del material desmoldado sometido a un golpeo lateral con la varilla de compactar. También se debe observar la terminación de la superficie del hormigón al ser tratada con la cuchara de albañil, esto nos permite establecer si existe un exceso de arena o de agregado grueso. El conjunto de información dado por estas tres determinaciones nos permiten tener una idea más acabada de la trabajabilidad. El reglamento CIRSQC 201 establece diferentes ámbitos de consistencia que se muestran en la Tabla anterior.

Prueba de fluidez (IRAM 1690:1986)

Esta prueba indica la consistencia y la tendencia a la segregación del hormigón, midiendo la dispersión de un pequeño volumen de material sujeto a un número establecido de sacudidas sobre una mesa de Graf. Esta prueba es valiosa para estudiar la segregación, da también una buena idea de la consistencia de las mezclas rígidas, ricas y más bien cohesivas. El aparato consta de una mesa de latón de 76 x 76 cm y montada de una manera que pueda ser sacudida por medio de caídas de 4 cm. Se llena molde troncocónico de 20 cm de altura y diámetros de 13 y 20 cm, en dos capas compactadas 10 veces con la varilla de compactación. Se retira el molde. Se levanta la mesa y se la deja caer 15 veces en 25 seg. Se miden dos diámetros, perpendiculares, de la mezcla esparcida, tomando el valor promedio como extendido (Figura 7).

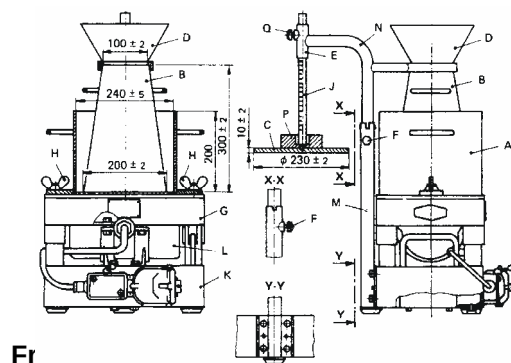
Este método tiene como inconveniente que mezclas muy fluidas, con alto contenido de agua, dan una fluidez alta, aunque no resultan ser sinónimo de trabajabilidad. El material en este caso es segregable.



Ensayo de la mesa de Graf (Bascoy)

Prueba de remoldeo de VeBe (IRAM 1767:2004)

Este ensayo es afín a la prueba de remoldeo. Aquí se omite el anillo interior y la compactación se logra por medio de una mesa vibradora. La prueba finaliza cuando la placa de vidrio superior queda totalmente mojada por el hormigón. El parámetro que se mide es el tiempo necesario para remoldear la mezcla. El campo de aplicación es el de hormigones muy secos. Este método es representativo de la forma en que el material se coloca en obra. El nombre del mismo se debe a las iniciales de su inventor, V. Bahrner, de Suecia (figura 8).

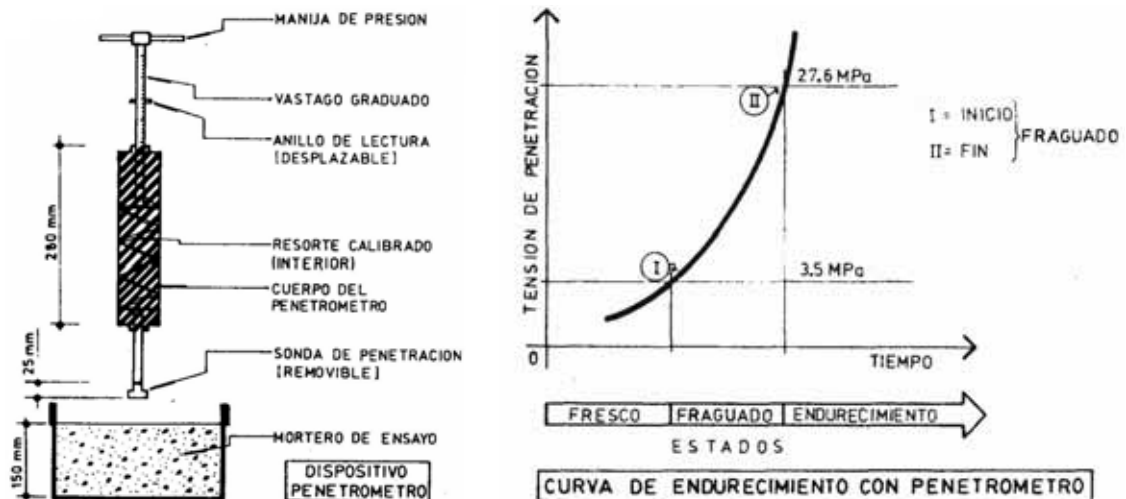


Ensayo de remoldeo de VeBe (IRAM)

Fr

El ensayo de tiempo de fraguado del hormigón se realiza sobre una mezcla con las condiciones en que será utilizada en obra, y su resultado sirve para establecer el tiempo en que el material se puede colocar, compactar, terminar superficialmente, sin destruir los vínculos físico-químicos que se van formando.

El fraguado del hormigón se determina sobre una muestra de mortero obtenido por tamizado del hormigón con las proporciones y materiales tal cual se empleará en obra. Sobre el mortero periódicamente se determina la resistencia a la penetración con una aguja Proctor. A medida que el material va rigidizándose, se cambia la aguja por otra más fina a fin de disminuir el esfuerzo para alcanzar una penetración de una pulgada. Los valores de resistencia a penetración se grafican en función del tiempo. Se establece que el tiempo de fraguado inicial se corresponde con una resistencia a penetración de 35 kg/cm^2 , y el tiempo final cuando la resistencia alcanza los 280 kg/cm^2 .



Ensayo de semi-esfera de Kelly (Bascosky)

Propiedades del hormigón endurecido

El hormigón presenta características favorables en el estado endurecido que le permiten ser un material de uso masivo en las construcciones civiles. La más importante de las propiedades de este material en ese estado, es la durabilidad. Aunque siempre se hace hincapié en la resistencia, tal vez por que es más fácil de evaluar y resulta muy útil a los proyectistas para el cálculo y diseño de una estructura de hormigón armado. Los procesos de deterioro del hormigón y del acero de refuerzo generalmente se discuten en un ámbito que no incluye a los calculistas.

Durabilidad

Se define como durabilidad a la habilidad del material para resistir la acción de la intemperie, los ataques químicos, abrasivos y cualquier otro proceso de deterioro. Es indispensable que el hormigón mantenga su forma original, su calidad y serviciabilidad cuando está expuesto al medio ambiente, tal cual ha sido proyectado. Cuando esto ocurre se afirma que el hormigón es durable.

Los factores que alteran esta propiedad pueden ser externos o internos. Las primeras causas pueden ser originadas por condiciones atmosféricas desfavorables, temperaturas extremas, abrasión, ataques por líquidos o gases. Las causas internas son la reacción álcali-agregado, cambios volumétricos y, sobre todo, la permeabilidad del hormigón.

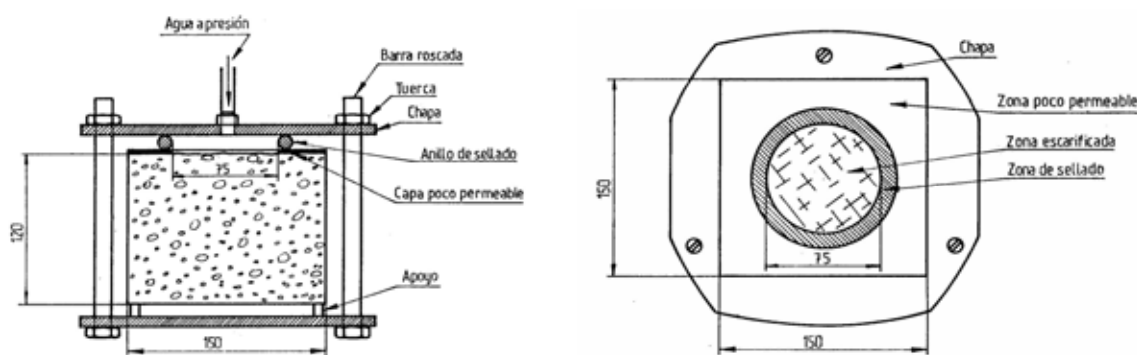
La penetración de iones en solución puede afectar adversamente la durabilidad del hormigón. Este ingreso depende de la permeabilidad del hormigón y está determinado por la facilidad con que el hormigón puede saturarse de agua, por lo tanto, la permeabilidad se asocia directamente con la vulnerabilidad del hormigón. El ingreso de líquidos al interior del hormigón se puede originar por dos mecanismos:

Absorción: es la capacidad de un material de retener agua en su masa.

Permeabilidad: es la propiedad de permitir la circulación de agua a través de él.

Ensayo de Permeabilidad (IRAM 1554:1983)

Se utilizan probetas de sección cuadrada o circular de diámetros o lados de 15, 20 o 30 cm y con un espesor mínimo de 15 cm, asegurando en todos los casos que las dimensiones sean mayores al triple del tamaño máximo del agregado grueso. La superficie de estas probetas que no está afectada al ensayo se sella mediante dos capas de pasta de agua y cemento con una razón a/c de 0.4. Posteriormente, se aplica agua a presión: 0.1 MPa durante las primeras 48 hs, 0.3 MPa las siguientes 24 hs y 0.7 MPa las últimas 24 hs. Una vez cumplido el ciclo de aplicación de agua a presión, se dividirá la probeta en dos mitades (aplicando carga con una prensa), determinado sobre cada superficie la penetración máxima de agua en el hormigón.



Esquema de ensayo de permeabilidad (IRAM)

Succión capilar

La tendencia del material a absorber agua crea una succión capilar que es función de la tensión superficial del líquido, y de la geometría y dimensiones de los poros.

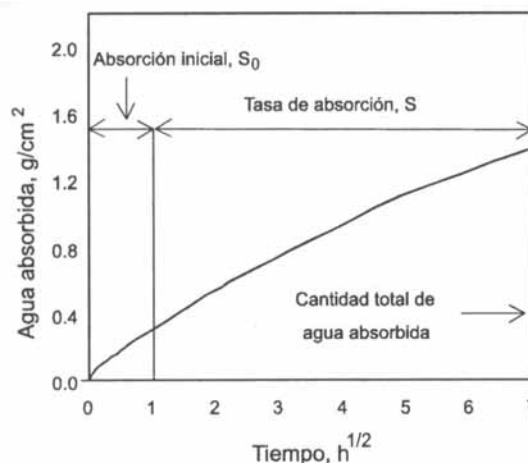
La capacidad y la velocidad de succión del hormigón y particularmente del hormigón de recubrimiento es un parámetro asociado con la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Este comportamiento se ajusta a la siguiente

$$I = C + S t^{1/2}$$

donde I es la cantidad acumulada de agua
S la tasa de succión, t el tiempo de inmersión
constante que tiene en cuenta la perturbación
provocada por las condiciones de ensayo y
depende de la terminación de la superficie.

Representación resultados de ensayo
de succión capilar (Menéndez et. Al)



expresión:

absorbida,
y C una
inicial
que

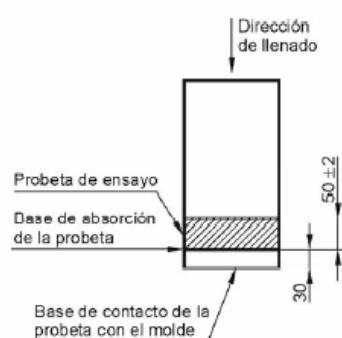
Ensayo de succión capilar (IRAM 1871:2004)

El método consiste en registrar el incremento de masa de una muestra, constituida por una probeta o testigo de hormigón endurecido, sometido a la acción del contacto con agua en una de sus bases.

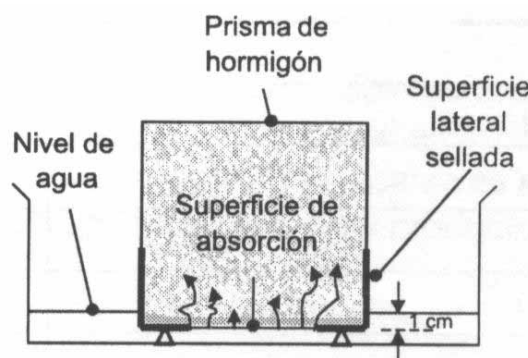
Las muestras de ensayo están constituidas por probetas y/o testigos calados de hormigón endurecido sobre los cuales se realiza un primer aserrado a 3 cm del extremo correspondiente a la base de contacto de la probeta con el molde, se descarta el corte realizado y se reitera el aserrado de la probeta a una distancia de 50 mm ± 2 mm, esta sección conforma la probeta de ensayo (figura 6).

Se sella con pintura impermeabilizante toda la superficie lateral de las probetas o testigos para evitar la absorción en ese sector no contemplado en los cálculos y se secan en estufa a $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

Las probetas se introducen en un recipiente cerrado, sobre la base de apoyo, con una altura de agua respecto de la base de absorción de $2\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ y a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 7). Este instante se registra como el tiempo inicial del ensayo ($t=0$) y luego, periódicamente, se retira cuidadosamente cada probeta o testigo, se enjuga con un paño la base de absorción y la superficie lateral y se determina la masa húmeda.



Obtención de probetas (IRAM)



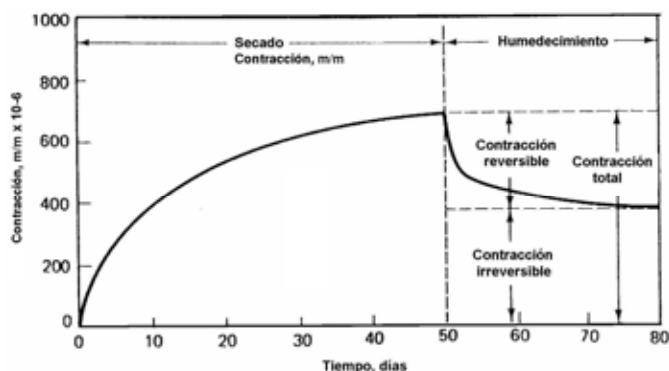
Esquema de ensayo de succión (Menéndez et. Al)

Estabilidad volumétrica

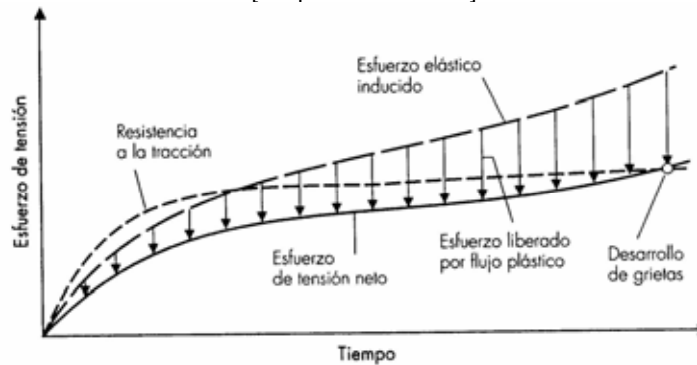
El hormigón es inestable volumétricamente y específicamente la pasta es la responsable de los cambios que sufre el material, cuando se modifica el grado de humedad o se halla sometido a un esfuerzo permanente. Un buen hormigón puede tener variaciones de 150 a $200\text{ }\mu\text{m/m}$, y cuando existe un exceso de agua de mezclado puede alcanzar los 400 ó $500\text{ }\mu\text{m/m}$. Estas dilataciones y contracciones que sufre el hormigón generan tensiones de compresión y de tracción, respectivamente, si los vínculos (fundación, capa de hormigón de mayor edad) se las restringen. Los esfuerzos de compresión no crean problemas, pero si los de tracción, debido a la poca capacidad que tiene el hormigón para resistir este tipo de esfuerzos. El agua, al ingresar al hormigón provoca un incremento de volumen por la presión que genera, luego, al evaporarse el efecto es contrario, el material se contrae.

Contracción por secado

Las variaciones de humedad en el hormigón endurecido están indefectiblemente acompañadas por variaciones volumétricas. La reducción de volumen que se produce durante el secado se denomina contracción por secado y el aumento de volumen, como resultado de un rehumedecimiento, hinchamiento o expansión. Parte de esta deformación es irreversible y debe distinguirse de la parte reversible, llamada movimiento por humedad.



Comportamiento típico del hormigón sometido a secado y rehumedecimiento.
[adaptado de Neville]



Patrón esquemático de desarrollo de una grieta cuando el esfuerzo a tracción debido a la contracción restringida es aliviado por la fluencia lenta. [Neville]

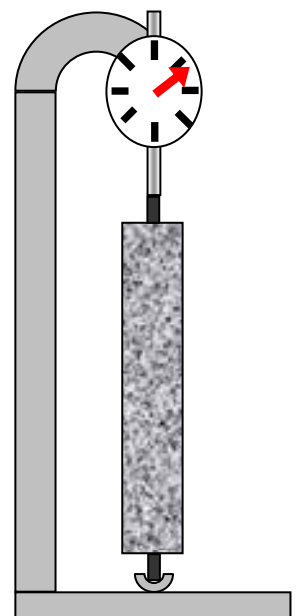
Ensayo contracción por secado (IRAM 1597:1992)

Las probetas utilizadas son de sección cuadrada de 25 mm de lado y 250 mm de longitud efectiva para el caso de los morteros y de 100 mm de lado en el caso de los hormigones. En este caso se define a la longitud efectiva como la distancia entre las caras internas de los puntos de referencia que se colocan en los extremos de las piezas. Las probetas se desmoldan una vez transcurridas 24 horas, durante las que se mantienen a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y no menos de 90 % de humedad relativa. En ese momento se toma la lectura inicial y se las mantiene luego, hasta completar el período de 28 días, en una cámara con 100 % de humedad relativa o sumergidas en una solución saturada de hidróxido de calcio a $23 \pm 1^\circ\text{C}$. La norma permite variar la duración de este período de curado cuando sea necesario.

Una vez concluido el período de curado se registra nuevamente la longitud de las probetas y se almacenan en una cámara que mantiene una humedad relativa del $50 \pm 2\%$ y una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, a menos que se establezcan condiciones diferentes. Las lecturas posteriores de la longitud de las probetas se realizan a las edades de 3; 7; 28 y 56 días y de 3; 6; 9; y 12 meses a partir de la finalización del curado húmedo.

Mecanismos de rotura en hormigón

El mecanismo de falla del hormigón, tanto bajo cargas de compresión como de tracción, involucra un proceso progresivo de deterioro interno del material. Este daño interno, se caracteriza por un incremento y propagación de micro y macrofisuras que en términos de balance energético reconocen dos estados: uno de crecimiento estable, donde la energía necesaria para que se produzca la propagación de las fisuras debe ser suministrada al material a través de un incremento de la sollicitación externa y otro de crecimiento inestable, donde el nivel energético alcanzado resulta suficiente para que la fisura se propague por sí sola sin mayor demanda de energía.



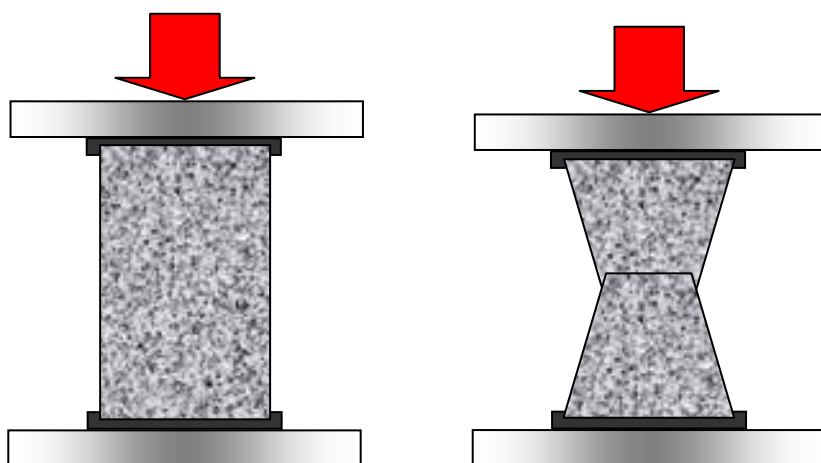
Medición de una probeta durante el ensayo de contracción

Resistencia a compresión (IRAM 1546:1992)

Es una de las propiedades más valiosas del hormigón, a pesar que en algunos casos prácticos otras características, como la durabilidad o permeabilidad, pueden resultar más importantes. No obstante, la resistencia ofrece un panorama general de la calidad del hormigón, porque esta relacionada directamente con la estructura de la pasta endurecida de cemento.

La más común de todas las pruebas de hormigón endurecido es la prueba de la resistencia a la compresión, lo cual en parte obedece a que es una prueba fácil de realizar, y en parte a que muchas de las características deseables del hormigón, aunque no todas, se relacionan cualitativamente con su resistencia; no obstante, la razón principal consiste en la importancia intrínseca que reviste la resistencia a compresión del hormigón en la construcción.

Se utilizan probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, o de otras dimensiones pero manteniendo una relación entre la altura de la probeta y el diámetro de igual a 2 ($h/d = 2$). La carga se aplica a una velocidad de $0.4 \text{ MPa/s} \pm 0.2 \text{ MPa/s}$.

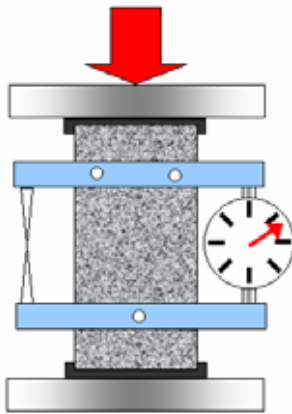


Ensayo de compresión de probetas cilíndricas de hormigón

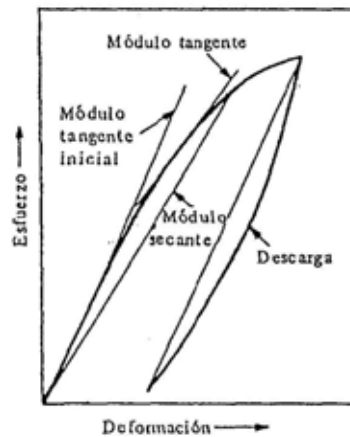
Módulo de elasticidad estático

Para evaluar la rigidez del hormigón, del mismo modo que para otros materiales, se debe determinar el módulo de elasticidad del hormigón. Esta determinación resulta un tanto compleja, debido a que en el hormigón no existe una proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida. El diagrama tensión-deformación al comienzo de la carga es casi recto y el módulo de elasticidad tangente inicial no es un valor práctico debido a que el nivel de esfuerzo aplicado es muy bajo, debido a que en la estructura el hormigón trabajará en un rango superior. También se puede determinar el módulo de elasticidad secante, que esta dado por la recta que une el origen de coordenadas y un punto determinado en la curva. Tiene el inconveniente que el material al no ser lineal, este módulo dependerá del valor de carga elegido. El módulo de elasticidad en la rama de descarga es muy aproximado al tangente inicial (figura 25).

Para la determinación del módulo de elasticidad se mide la deformación que se produce al aplicar escalones de carga crecientes hasta alcanzar el 40 % de la carga de rotura de la probeta.



Ensayo de módulo de elasticidad



Curva tensión deformación para el H°

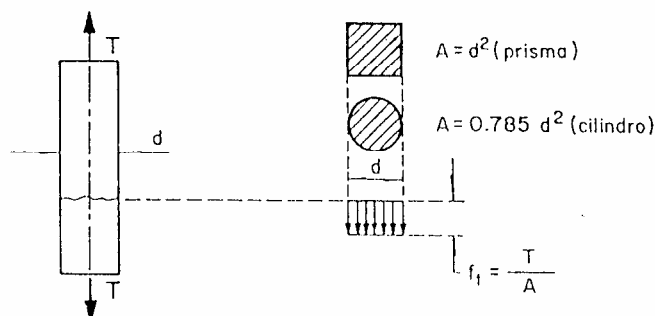
Resistencia a la tracción

La resistencia a tracción y a compresión están relacionadas, pero no en forma proporcional. A medida que la resistencia a compresión del hormigón aumenta la resistencia a tracción también se incrementa pero a una velocidad decreciente. Es decir, la relación tracción-compresión depende del nivel de resistencia, a mayor resistencia a compresión menor es dicha relación. La resistencia a la tracción se puede evaluar por tres métodos: tracción directa, tracción por compresión diametral y flexo-tracción.

Tracción Directa: Esta metodología de ensayo tiene el inconveniente que al ser aplicado sobre un material frágil, se puedan producir roturas locales en la zona de aplicación de la carga. También es difícil de lograr la perfecta alineación del sistema probeta-sujeción-máquina de ensayo, a efecto de evitar excentricidades en la aplicación de la carga.

Métodos de aplicación de las cargas:

- Transmisión de las cargas a través de barras embebidas en el hormigón.
- Sujeción por pegado.
- Sujeción por ensanche de la sección en los extremos.
- Sujeción por fricción lateral.



Ensayo de tracción directa

Tracción por Compresión Diametral: Consiste en comprimir la probeta lateralmente, a través de una generatriz. Se establece así un diagrama de tensiones, que en la parte central es de tracción. La probeta rompe por tracción porque se alcanza el valor de rotura de este tipo de sollicitación antes que el de compresión (figura 29).



Diagrama de un sistema de tres elementos rígidos en serie, soportados por tres apoyos de rodadura. El sistema está sometido a una carga vertical unitaria en el centro. Se muestran las reacciones de apoyo y los momentos de flecta en los apoyos y en la carga.

Esquema de ensayo de tracción por flexión (IRAM)

Debido a la baja resistencia del hormigón para soportar esfuerzos de tracción, se colocan en su interior barras de acero, el material así obtenido se denomina hormigón armado. Desde el punto de vista de la resistencia lo que hace posible que el hormigón y el acero se comporten como un sólido único, es la adherencia. El módulo de elasticidad del hormigón es muy variable oscilando entre 15000 y 40000 MPa, mientras que en el acero este valor es de 210000 MPa y resulta ser constante. La adherencia se produce principalmente por fricción y se aumenta con las nervaduras y filetes que poseen las barras de acero.

El hormigón convencional elaborado con cemento portland y agregados tradicionales presenta diversas deficiencias. Algunos intentos por solucionar estas deficiencias han provocado el desarrollo de hormigones especiales, que representan avances importantes en la tecnología del hormigón. A continuación se estudian los aspectos principales de algunos de estos materiales.

La denominación de "HORMIGONES LIVIANOS" cubre toda una gama de materiales de construcción de muy variadas características, cuya principal propiedad es su reducido peso específico, y que sólo tienen en común con el hormigón convencional, en lo que atañe a su composición, el empleo de cemento portland en su elaboración.

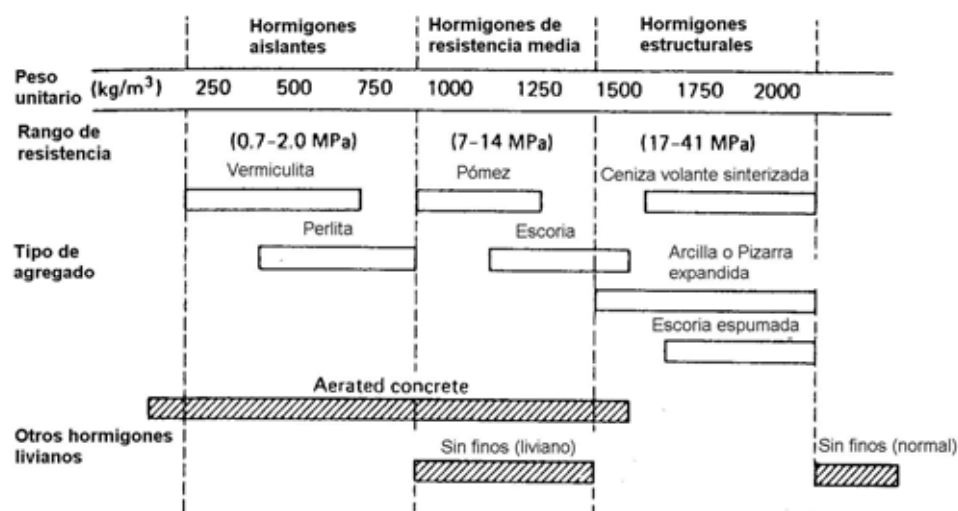
En términos generales los hormigones livianos pueden ser considerados como el resultado de la tendencia generalizada de obtener un material de construcción que, con las características de los hormigones tradicionales, reúna en grado apreciable cualidades de liviandad, capacidad aislante y economía.

Esencialmente la clasificación de los hormigones livianos se basa en los tres procedimientos que, en forma individual o simultánea, conducen a su elaboración:

- Formación de numerosas pequeñas celdas por incorporación de aire o gas en el seno de la masa de hormigón fresco y su mantenimiento hasta que aquél se endurezca (Hormigones Celulares).
- Utilización de agregados livianos (Hormigones de agregados livianos).
- Realización de grandes huecos por la supresión de los elementos finos del agregado, el cual tendrá una granulometría uniforme (Hormigones cavernosos o "sin finos").

Se podrán elaborar hormigones celulares de pesos específicos aparentes en estado seco comprendidos entre 300 y 1400 kg/m³, según el procedimiento de fabricación que utilice y la dosificación adoptada.

Los pesos específicos de los hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados livianos resultan muy variables y se describen en la figura adjunta.



Densidad correspondiente a diferentes hormigones livianos

Hormigones de alta performance

Los niveles de resistencia de los hormigones empleados en la construcción de estructuras han sufrido una evolución a lo largo del tiempo, que se acentuó en los últimos 20 años. En el inicio de la década del '70 la aparición de los aditivos químicos reductores de agua de alto rango resultó fundamental y las resistencias crecieron hasta los 80 MPa. En la década del '80 el mayor aporte fue la incorporación de adiciones minerales activas como las cenizas volantes y, en especial, la microsílice. En este período aparecen ejemplos de resistencias de 110 MPa.

Las tendencias actuales no se agotan en la obtención de un hormigón con alta resistencia; ellas incluyen tecnologías que utilizan mezclas con bajas relaciones agua / ligante, presencia de adiciones minerales, elevada fluidez y cohesión, posibilidad de transporte a distancia en motohormigoneras y facilidad de bombeo y compactación. Todo esto da como resultado estructuras más esbeltas y audaces, de mayor calidad y velocidad constructiva, más durables, de menor mantenimiento, y de menor costo global de los proyectos. Al material de estas características cabe la denominación de hormigón de alta performance (HAP).

En HAP la elección de algunas variables es mucho más limitada. Por ejemplo, el tamaño máximo del agregado está comprendido entre 12 y 25 mm, generalmente 19 mm. La relación a/c oscila entre 0.25 y 0.40 de acuerdo al nivel de resistencia buscado. El contenido del ligante, del cual dependerán varias propiedades, será el mínimo posible lo mismo que el contenido de agua. Por otro lado las mezclas tienen un requerimiento mínimo de finos para lograr las condiciones de fluidez necesarias.

La trabajabilidad queda condicionada al logro de una excelente compacidad: es muy conveniente que los HAP, particularmente si son empleados in situ, posean una fluidez elevada. De esta manera, se aseguran

además una mejor dispersión del ligante como así también una mejor adherencia entre la matriz (mortero) y el agregado grueso, para lo cual es imprescindible el uso de aditivos químicos reductores de agua de alto rango.

Hormigones autocompactables

El Hormigón Autocompactable (HAC) puede definirse como aquel que es capaz de fluir en el interior de los encofrados, pasar a través de las armaduras de refuerzo, llenar completamente el molde, logrando la compactación solamente por la acción de su propio peso (Okamura, 1997). Este hormigón debe llenar los encofrados y lograr una buena consolidación sin vibración, sin presentar segregación ni exudación. Además debe presentar una gran estabilidad, sin riesgo de producir obstrucción. Surge así un nuevo concepto de hormigón, que ofrece una muy buena colocación de la mezcla suprimiendo la obligatoria fase de vibrado. Las ventajas más consideradas son: facilidad de operación, acceso a zonas densamente armadas, mejor terminación de las superficies, mayor velocidad de llenado, menor contaminación acústica, ahorro en personal y equipos, óptima calidad de los elementos hormigonados.

La obtención de un "hormigón autocompactable" implica la necesidad de realizar nuevas valoraciones del hormigón fresco de modo de garantizar las propiedades deseadas. De este modo existe consenso acerca de requerir a un HAC tres propiedades particulares:

- Capacidad de llenado: esto es ser capaz de asegurar el llenado completo de los encofrados y el encapsulado de las armaduras con un hormigón homogéneo.
- Resistencia a la segregación: alcanzar la cohesión necesaria para permitir al hormigón fresco (partículas en suspensión) mantener su homogeneidad durante el mezclado, transporte y proceso de colocación.
- Capacidad de pasaje: dotar al hormigón de la habilidad para atravesar obstáculos y secciones densamente armadas.

La aparición de nuevas generaciones de aditivos denominados hiperfluidificantes o reductores de agua de alto rango ha hecho posible la elaboración de hormigones autocompactables. Respecto a los otros materiales componentes los HAC incrementan la cantidad de finos cuando se trabaja en niveles de resistencia convencional. Para ello suele apelarse al uso de filler calcáreo o de adiciones minerales.

Hormigones reforzados con fibras de acero (HRF)

Estos hormigones se desarrollaron con la finalidad de que las fibras incorporadas permitan controlar la propagación de las fisuras producidas por efecto de la aplicación de esfuerzos de tracción. Hoy en día se dispone para la elaboración de estos hormigones fibras de acero, de carbón, polipropileno, poliéster, polietileno, acrílicas, naturales, etc., siendo las más difundidas en nuestro medio las fibras de acero y las de polipropileno.

No obstante el comportamiento post-fisuración es el más importante en los HRF y por el cual se justifican la mayor parte de sus aplicaciones. Aquí nos encontramos frente a dos hechos fundamentales: por un lado el incremento en la capacidad resistente, por el otro un aumento en la tenacidad del material.

El significado de este incremento en tenacidad depende por supuesto del tipo de aplicación del material. Para el caso de colapso total (por ejemplo un terremoto) el área completa bajo la curva será una medida de la capacidad del material. Para otras aplicaciones (por ejemplo un puente) pueden existir limitaciones de servicio en la deformabilidad y solo el área comprendida bajo una parte de la curva (hasta una dada deformación) será de interés.

Hormigón compactado a rodillo (HCR)

El hormigón compactado a rodillo es un material compuesto básicamente de cemento portland, agregados pétreos y agua.

En estado fresco tiene consistencia seca (asentamiento nulo). Inmediatamente después de mezclado posee el aspecto de un material granular húmedo y debe ser transportado, colocado y compactado con los equipos propios de las obras de suelos y enrocados. En particular su compactación se realiza con rodillos vibratorios de gran energía. Luego de compactado y endurecido el HCR desarrolla propiedades semejantes a la del hormigón convencional.

Se utiliza en la construcción de diques y obras viales y la ventaja de su utilización se deriva de el uso de menor cantidad de agua y de ligantes, rapidez de ejecución, reducción del calor de hidratación y menores costos.

Se requiere para estos hormigones, la utilización de agregados perfectamente graduados, que garanticen el mínimo espacio a llenar entre ellos con pasta.

Durabilidad del hormigón

La durabilidad del hormigón se puede definir como la habilidad del hormigón para resistir la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los diferentes tipos de hormigón necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del hormigón, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del hormigón.

Resistencia al Congelamiento y Deshielo

Se espera que el hormigón empleado en estructuras y pavimentos tenga una vida larga y poco mantenimiento. El hormigón debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo mientras el hormigón está húmedo, principalmente en la presencia de anticongelantes (sales descongelantes).

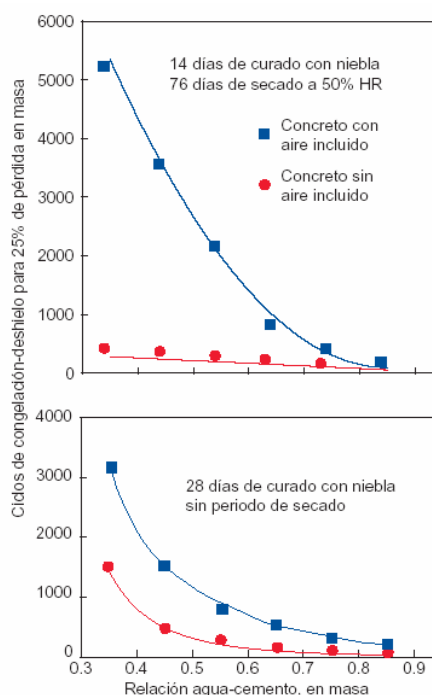
El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

Con el empleo de aire incorporado, el hormigón es altamente resistente a este tipo de deterioro, como se puede observar en la figura siguiente. Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces se alivie la presión hidráulica generada.

La figura siguiente enseña, para una serie de relaciones agua-cemento, que (1) el hormigón con aire incluido es más resistente a los ciclos de congelamiento y deshielo que un hormigón sin aire incluido, (2) el hormigón con baja relación agua-cemento es más durable que un hormigón con alta relación agua-cemento y (3) un periodo de secado antes de la exposición a la congelación y deshielo beneficia grandemente la resistencia al congelamiento y deshielo del hormigón con aire incluido. El hormigón con aire incluido y baja relación agua-cemento, con un contenido de aire del 5% al 8% va a resistir a un gran número de ciclos de congelación y deshielo sin presentar fallas.



El hormigón con aire incorporado (barra de abajo) es muy resistente a ciclos repetidos de congelamiento y deshielo.



Relación entre la resistencia a congelamiento y deshielo, relación a/c y desecación de hormigones con aire incorporado y sin aire incorporado.

Reacción Álcali-Agregado

La reactividad álcali-agregado es un tipo de deterioro que ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el hormigón. La reactividad es

potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable. La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas – reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es más preocupante que la reacción álcali-carbonato pues es más común la ocurrencia de agregados conteniendo minerales de sílice.

Las manifestaciones de la presencia de reactividad álcali-agregado son red de agrietamiento, juntas cerradas o lascadas o dislocación de diferentes partes de la estructura. Como el deterioro por reactividad álcali-agregado es un proceso lento, el riesgo de rotura catastrófica es bajo. La reacción álcali-agregado puede causar problemas de utilización (servicio, funcionalidad) y empeorar otros mecanismos de deterioro, como aquellos de la exposición a congelamiento, anticongelantes o sulfatos.

Las prácticas corrientes para el control de la reacción álcali-sílice incluyen el uso de adiciones minerales activas (cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, sílice activa (humo de sílice, microsílice) y puzolanas naturales) o cementos especiales. Estos materiales han sido verificados y comprobadamente pueden controlar la reacción álcali-sílice. La reducción del contenido de álcalis en el hormigón también puede controlar la reacción.

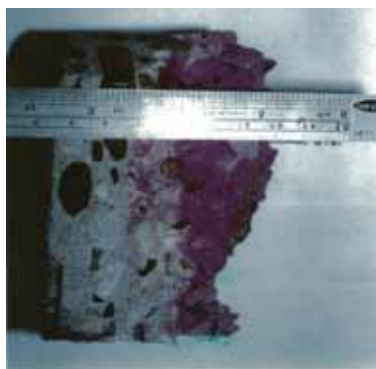


La fisuración, el cerramiento de las juntas y la dislocación lateral fueron causados por la severa reactividad álcali-agregado en este muro de parapeto.

Carbonatación

La carbonatación del hormigón es un proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el hormigón y reacciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio para formar carbonatos. En la reacción con el hidróxido de calcio hay formación de carbonato de calcio. La carbonatación del hormigón endurecido no hace daño a la matriz del hormigón. Sin embargo, la carbonatación reduce considerablemente la alcalinidad (pH) del hormigón. La alta alcalinidad es necesaria para la protección de la armadura de acero contra la corrosión y, por consiguiente, el hormigón debe ser resistente a la carbonatación para prevenirse la corrosión del acero de refuerzo.

Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el hormigón que tiene alta relación agua-cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia y pasta altamente permeable (porosa). La profundidad de la carbonatación en el hormigón de buena calidad y bien curado tiene generalmente poca importancia siempre que la armadura en el hormigón tenga suficiente recubrimiento.

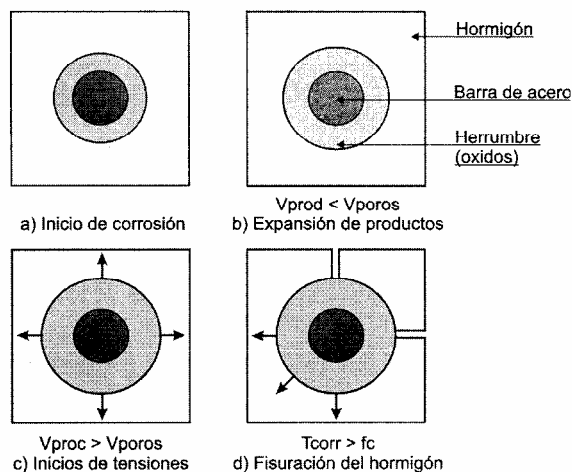
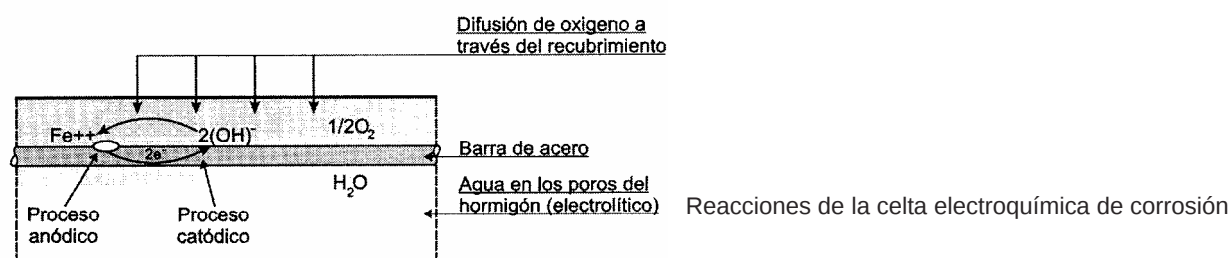


Carbonatación del hormigón: el sector coloreado en fucsia aún conserva su pH elevado, en tanto que el sector no coloreado ya ha sufrido un proceso de carbonatación y su pH es menor que 9.

Resistencia a los Cloruros y Corrosión de la Armadura

El hormigón protege a la armadura embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el hormigón (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones de cloruros de los anticongelantes y del agua del mar puede destruir o penetrar en la película. Cuando se alcanza el límite de corrosión por cloruros (aproximadamente 0.15% cloruro solubles en agua por peso de cemento), una célula eléctrica se forma a lo largo del acero y entre las barras de acero y el proceso electroquímico de la corrosión empieza. Algunas regiones del acero a lo largo de las barras se vuelven en ánodos, descargando corriente en la célula eléctrica; y de allá el hierro entra en solución. Las áreas del acero que reciben corriente son los cátodos donde los iones de hidróxido se forman. Los iones de hierro e hidróxido forman el hidróxido de hierro, Fe(OH) , el cual más tarde se oxida, formando polvo (óxido de hierro). La formación de polvo es un proceso expansivo – el polvo se expande hasta cuatro veces su volumen original – el cual induce a la formación de tensiones internas y descascaramientos del hormigón sobre el acero de refuerzo. El área de la sección transversal del acero también se puede reducir considerablemente.

La resistencia del hormigón a los cloruros es buena, pero se la puede mejorar con una baja relación agua-cemento (0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad. El aumento del recubrimiento encima del acero también reduce la migración de cloruros. Otros métodos de reducción de corrosión de acero incluyen el uso de aditivos inhibidores de corrosión, acero revestido con epoxi, tratamientos de superficie, revestimiento del hormigón y protección catódica.



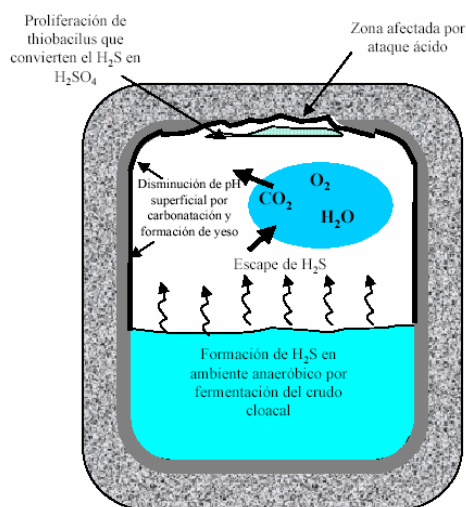
Fisuración del hormigón por formación de óxidos en la armadura corroída

Resistencia Química

El hormigón de cemento portland es resistente a la mayoría de los medio ambientes; sin embargo, el hormigón a veces es expuesto a sustancias que pueden atacar y causar deterioro.

El hormigón en la industria química y en las instalaciones de almacenamiento es especialmente propenso al ataque químico.

En el ataque ácido del hormigón hay disolución de la pasta de cemento y de los agregados calcáreos. Además del uso de hormigón con baja permeabilidad, los tratamientos de superficie pueden ayudar a evitar que las sustancias agresivas entren en contacto con el hormigón.



Esquema del ataque ácido causado por la acción bacteriana en un conducto de desagüe cloacal

Sulfatos y Cristalización de Sales

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un hormigón que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar un hormigón pues reaccionan con los compuestos en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del hormigón (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita y yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma primeramente en la superficie del hormigón, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado.

Como en las rocas naturales, tales como en las piedras calizas, el hormigón poroso está susceptible al ataque de las intemperies causado por cristalización de sales. Estas sales pueden o no contener sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el hormigón. Algunas sales conocidas por causar deterioro en hormigón son el carbonato de sodio y sulfato de sodio. El mayor daño ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En hormigones permeables, expuestos a condiciones de secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por la acción de los capilares y, posteriormente, – como resultado de la evaporación en la superficie – la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, algunas veces generando presiones suficientes para causar la fisuración. Si la tasa de migración de la solución de sal a través de los poros es menor que la tasa de evaporación, se forma una zona de secado debajo de la superficie, ocurriendo cristalización en los poros y causando expansión y descascaramiento. Ambas, las partículas de agregado y la pasta de cemento pueden ser atacadas por sales.

Para que se obtenga la mejor protección contra el ataque externo por los sulfatos: (1) diseñe el hormigón con baja relación agua/materiales cementantes (aproximadamente 0.4) y (2) use cementos especialmente formulados para ambientes con sulfatos.



Vigas de hormigón después de muchos años de exposición a un suelo con alta concentración de sulfatos