

Taller Vertical de Estructuras Villar-Farez-Lozada		Nivel: 2
Tema: Hormigón de Cemento Portland	Elaboración: Ing. Valeria Taus	Año: 2011

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón ocupa un lugar destacado en la industria de la construcción constituyendo uno de los materiales mundialmente más utilizados con fines estructurales.

Su amplio uso se atribuye a su condición, única entre los materiales básicos de la construcción, de presentar las características de un líquido viscoso durante el período en el que se lo fabrica, transporta y coloca, lo cual permite la generación de elementos de distintas formas y tamaños, para pasar luego a constituirse en un sólido poroso resistente a la acción de esfuerzos mecánicos y agentes agresivos. Es de destacar además, su capacidad para fraguar¹ bajo agua, su bajo costo y disponibilidad de materias primas (sobre todo en nuestro país).

II. DEFINICIÓN

El hormigón es un material compuesto, constituido por partículas minerales inertes (agregados finos y gruesos) inmersos en un medio ligante, llamado pasta de cemento². Dicha pasta está formada por una combinación de agua y cemento portland que al endurecerse confiere al conjunto una consistencia asimilable a la pétreo.

El medio ligante llena los vacíos existentes entre los agregados, da trabajabilidad a la mezcla en estado fresco y proporciona la resistencia mecánica necesaria. Los agregados por su parte, constituyen un material de relleno de bajo costo, a la vez que reducen los cambios de volumen producidos durante el fraguado y endurecimiento³, también los originados en cambios de la humedad interna de la pasta de cemento.

III. MATERIALES COMPONENTES

III.a. PROPORCIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES

Para la elaboración del hormigón se requiere el empleo de agregados gruesos (piedras), agregados finos (arenas), cemento y agua en proporciones variables dependiendo de las propiedades buscadas. En hormigones convencionales las proporciones comúnmente usadas se indican en la Fig.1.

III.b. CEMENTO PORTLAND

Hidratación del cemento

El cemento es un material pulverulento, de color gris a gris verdoso, que al mezclarlo con agua forma una pasta y reacciona químicamente, dando lugar a nuevos productos (productos de hidratación), de características aglomerantes. Dichos productos van ocupando los vacíos inicialmente llenos de agua, tendiendo a la formación de un cuerpo continuo, conduciendo al fraguado y posterior endurecimiento.

La “hidratación del cemento” debe desarrollarse bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura a fin de reducir al máximo la porosidad, obteniendo un material con aceptables

¹ Fraguado: proceso de solidificación y pérdida de plasticidad de la mezcla fresca, por desecación y cristalización.

² Mezcla de cemento y agua.

³ Fase posterior al fraguado asociada a la ganancia de resistencia de la mezcla, la cual presenta un desarrollo progresivo.

propiedades resistentes y durables. Dichas propiedades están condicionadas además por las características tecnológicas y proporciones relativas de los materiales utilizados, por las condiciones de elaboración, transporte, colocación, compactación⁴ y curado⁵.

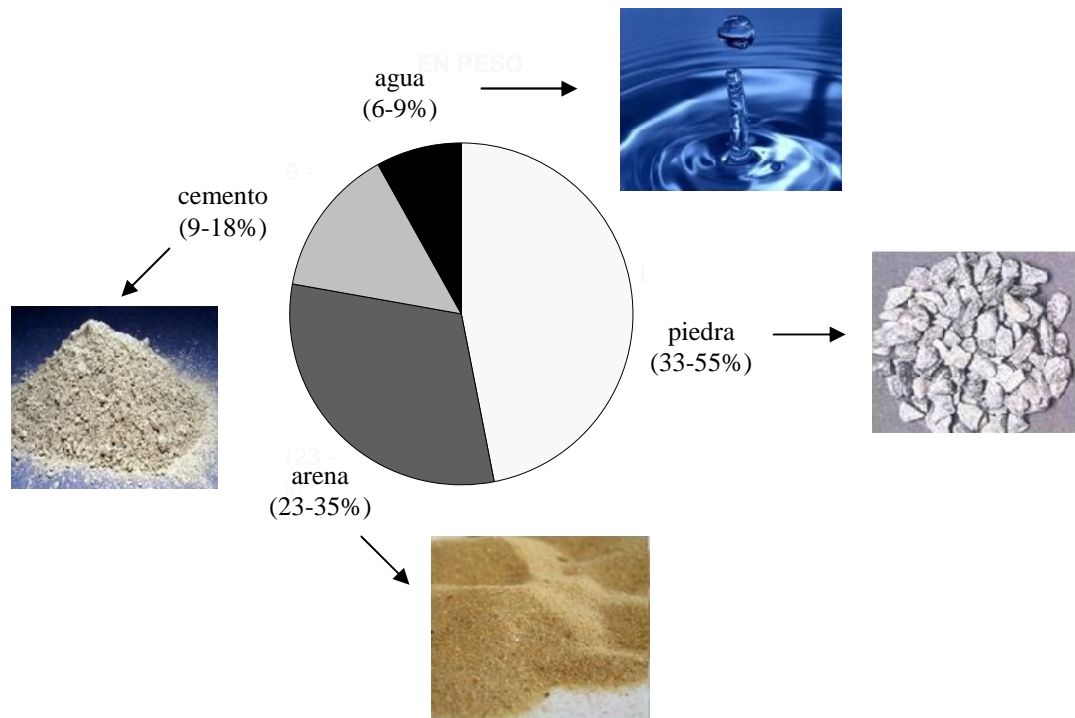


Figura 1: Proporciones relativas de los materiales componentes del hormigón (% en peso).

Tipos de cemento

Existe una gran variedad de cementos disponibles en el mercado. En nuestro país la norma IRAM 50.000 establece el empleo de los cementos para uso general y la 50.001 para usos especiales.

Cementos de uso general:

Cemento portland compuesto (CPC): es el cemento de mayor utilización en la industria de la construcción presenta muy buena trabajabilidad en estado fresco, buena resistencia final y durabilidad.

Cemento portland normal (CPN): aplicable en toda construcción donde no se requieren características especiales de resistencia y/o durabilidad. De muy baja producción en la actualidad.

Cemento portland con filler calcáreo (CPF): de aplicación en obras que no presentan requerimientos especiales, mejora el comportamiento en estado fresco al proporcionar una mejor trabajabilidad. Su resistencia final suele ser menor a la obtenida con otros tipos de cementos.

Cemento portland con escoria (CPE): puede utilizarse en cualquier tipo de construcción, aunque habitualmente se lo emplea por cuestiones de durabilidad (adecuada impermeabilidad y buena durabilidad frente al ataque químico).

⁴ Operación en la cual se elimina del hormigón fresco la mayor cantidad posible de los vacíos, sea en forma manual o mecánica.

⁵ Proceso mediante el cual se le confiere al hormigón las condiciones propicias de humedad y temperatura para el desarrollo de las reacciones de hidratación.

Cemento portland puzolánico (CPP): es apto para cualquier tipo de obra, en especial cuando se requieran propiedades asociadas a la durabilidad (menor porosidad y resistencia a medios agresivos). Otorga altas resistencias finales aunque su desarrollo de resistencia es lento, por ello requieren de un curado prolongado.

Cemento de alto horno (CAH): se emplea cuando se requiere bajo calor de hidratación⁶, buena resistencia a sulfatos (aguas o suelos sulfatados) y a la reacción álcali-agregado (agregados reactivos). Otorga resistencias finales más altas que las obtenidas con CPN aunque su desarrollo de resistencia es algo lento.

Los cementos con propiedades especiales corresponden a los cementos de uso general, donde variaciones introducidas en la composición, generan un producto final con propiedades particulares. Estas propiedades los hacen aptos para determinadas aplicaciones relacionadas con la tipología estructural, las condiciones de exposición, la metodología constructiva, el tipo de agregado, entre otras. Los cementos con propiedades especiales son: **Cemento de Alta resistencia inicial (ARI), Resistente a los sulfatos (de resistencia alta (ARS) o de moderada (MRS)), de Bajo calor de hidratación (BCH), Resistente a la reacción álcali-agregado (RRAA) y Cemento Blanco (B).**

El de mayor uso lo constituye el **Cemento de Alta resistencia inicial (ARI)**, utilizado cuando se requieren altos niveles y un desarrollo rápido de resistencia como el caso de obras que necesitan una pronta habilitación (Ej.: pavimentos) o cuando se requiere una rápida reutilización de los encofrados, siendo también apropiados para la prefabricación. Debido al alto calor de hidratación que genera no se recomienda en elementos estructurales de espesor mayor a los 40 cm ya que al dificultar la disipación del calor, puede provocar la aparición de fisuras.

De acuerdo al nivel resistente los cementos se clasifican según tres categorías: 30, 40 y 50, número que indica la resistencia a compresión mínima del cemento (MPa) obtenida a los 28 días. Para identificar un cemento primero se indica el tipo, luego el nivel resistente y finalmente si corresponde, se coloca entre paréntesis su requisito especial. Ejemplo: CPC40 (ARS), cemento portland compuesto, categoría 40, de alta resistencia a los sulfatos.

Por último, los cementos deberán cumplir con los requisitos físicos, químicos y resistentes establecidos en las respectivas normas IRAM.

III.c. AGREGADOS

Los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos o arenas presentan tamaños de partículas que van de 75 μm a 5 mm y los agregados gruesos o piedras varían entre 5 y 50 mm.

III.c.1. AGREGADOS FINOS

Los agregados finos pueden obtenerse en forma directa de los ríos (Fig.2a), lagos y depósitos volcánicos, o bien en forma indirecta mediante la trituración de rocas (arenas de trituración) (Fig.2b). Las primeras resultan de la desintegración de las rocas por meteorización y abrasión, poseen formas redondeadas debido al desgaste provocado por el viento y el agua. Las segundas suelen ser rugosas, de aristas vivas y angulosas, consecuencia de los procesos de trituración utilizados en su producción. Debido a esto, las arenas obtenidas en forma directa conducen a hormigones más trabajables que las segundas.

Respecto al tamaño, las arenas más gruesas producen mezclas ásperas siendo necesario incorporar mayor proporción de agua para aumentar la trabajabilidad. Son apropiadas para hormigones de elevado contenido unitario de cemento o de baja trabajabilidad.

⁶ Calor liberado durante el proceso de hidratación debido a reacciones químicas exotérmicas.

Para tener una medida del tamaño de partículas se calcula el **módulo de finura (MF)**, número obtenido al sumar los porcentajes de arena retenidos (acumulados) por una serie normalizada de tamices y dividir dicha suma por 100. Si bien no es representativo de la distribución granulométrica de los agregados, es utilizado como parámetro de diseño de mezclas de hormigón en los métodos racionales de dosificación. Los agregados finos deben presentar un MF comprendido entre 2,3 y 3,1, cuanto mayor es este número tanto mas grueso es el agregado.

Es preciso aclarar que las arenas a emplear para la elaboración de hormigones deben encontrarse limpias, libres de polvo, partículas de arcilla, sales solubles, materia orgánica y conchillas. En ciertos casos es posible, a través del lavado, reducir el contenido de impurezas a valores considerados aceptables por los reglamentos.

a)



b)



Figura 2: Tipos de agregados finos: a) arena de río y b) arena de trituración.

III.c2. AGREGADOS GRUESOS

Los agregados gruesos también pueden obtenerse directamente de los lechos de los ríos o de depósitos naturales, como por ejemplo el canto rodado (Fig.3a), o en forma indirecta mediante la explotación de macizos rocosos y la posterior trituración, como el caso de la piedra partida (Fig.3b).

a)



b)



Figura 3: Tipos de agregados gruesos: a) canto rodado y b) piedra partida.

Los agregados provenientes de la trituración de rocas resultan angulosos y de aristas vivas a diferencia de los obtenidos de lechos de ríos, los cuales presentan formas redondeadas, debido al desgaste natural producido por el movimiento y arrastre del agua. Los agregados alargados disminuyen la trabajabilidad y resistencia mecánica. Las superficies rugosas mejoran la adherencia y resistencia, mientras que las lisas mejoran la trabajabilidad pero disminuyen la adherencia.

Respecto a su peso específico los agregados se dividen en: livianos, normales y pesados, diferencias que los hacen aptos para usos específicos. En las estructuras tradicionales como edificaciones se emplean los agregados de peso normal (peso específico: 2,5 a 3 kg/dm³).

En cuanto a la dimensión, se identifica convencionalmente como **tamaño máximo** a la abertura de la malla del menor tamiz, de una serie normalizada, a través del cual pasa como mínimo el 95% del peso total del material. El tamaño máximo comúnmente más empleado en las construcciones convencionales de hormigón armado es de 19 o 25 mm. Dicho tamaño está limitado por la separación de armaduras y por las dimensiones del elemento estructural.

Los agregados a emplear en la elaboración de hormigones deberán consistir en partículas con una adecuada resistencia mecánica, con tamaños y formas estables que permitan resistir las condiciones de exposición a la intemperie (resistencia física y química) y no deben contener materiales y/o sustancias nocivas que puedan causar el deterioro del hormigón, tales como polvo, sales solubles, materia orgánica, etc.

Con el fin de lograr un diseño óptimo, es necesario que las curvas granulométricas de los agregados, tanto finos como gruesos, se encuentren dentro de los límites granulométricos establecidos en el Reglamento CIRSOC 201 y por la norma IRAM 1627. En caso contrario se obtendrá un hormigón con mayor requerimiento de pasta y será más propenso a segregarse⁷. A su vez la curva correspondiente a la totalidad de agregados debe resultar bien gradada⁸, de modo tal de obtener la máxima compacidad a fin de minimizar los requerimientos de pasta, sin perjuicios en las condiciones de colocación y compactación.

III.d. AGUA DE AMASADO

La presencia de impurezas en el agua tales como sólidos suspendidos, ácidos, álcalis, sulfatos, cloruros, sales y materia orgánica entre otros, puede afectar el tiempo de fraguado, retardar el endurecimiento, reducir la resistencia, aumentar el riesgo de corrosión de las armaduras y producir eflorescencias.

Toda agua bebible que no presente gusto, olor y/o color particulares y que no resulte gaseosa ni espumosa al agitarse, puede ser aceptada como agua de mezclado. Ciertas aguas no consideradas potables pueden resultar satisfactorias para la elaboración de hormigones. Cuando existan dudas sobre la aptitud del agua a ser utilizada deberán realizarse ensayos físicos comparativos (IRAM 1601) elaborando probetas de cemento con agua de probada aptitud y con el agua de dudosa calidad. Se considerará aceptada el agua de dudosa calidad cuando la resistencia obtenida en la muestra con ella elaborada resulte como mínimo del 90% de la obtenida en la muestra patrón y cuando ensayos efectuados sobre pastas de cemento demuestren que no acelera el tiempo de fraguado inicial ni retasa el tiempo de fraguado final más allá del 10% en ambos casos. Además, el agua deberá cumplir con los requisitos químicos establecidos en la mencionada norma y en el Reglamento CIRSOC 201.

III.e. ADICIONES Y ADITIVOS

Las **adiciones minerales** son compuestos naturales o artificiales que se incorporan al cemento o directamente al hormigón a fin de mejorar el comportamiento en estado fresco y/o endurecido.

El empleo de adiciones minerales surgió fundamentalmente por cuestiones ecológicas vinculadas a la reducción de la emanación de dióxido de carbono en la fabricación del cemento, a la utilización de subproductos industriales y a la reducción del impacto provocado por la disposición de desechos. Sumado a lo anterior, estos materiales reducen los costos, ya que son

⁷ Segregación: separación de los materiales componentes del hormigón en estado fresco.

⁸ Curva granulométrica compuesta por diferentes tamaños de partículas.

utilizados como reemplazo parcial del cemento, a la vez que permiten la obtención de hormigones con propiedades especiales que los destacan de los hormigones sin adiciones.

Las adiciones minerales más empleadas en Argentina son las **puzolanas** (ceniza volcánica, toba, tierras de diatomeas, arcilla calcinada, travertino), **escoria de alto horno** (subproducto de la fabricación del hierro) y **filler calcáreo** (roca caliza molida). En general las puzolanas y las escorias disminuyen el calor de hidratación y la permeabilidad. Si bien presentan desarrollos lentos de resistencia, lo cual obliga a aumentar el período de curado, las resistencias finales adquiridas resultan mayores. El filler calcáreo mejora el comportamiento del hormigón en estado fresco, facilita la hidratación del cemento incrementando la resistencia inicial pero no así la final, la cual resulta inferior.

Los **aditivos** son productos líquidos o pulverulentos que se agregan al hormigón en muy pequeñas dosis a fin de modificar algunas de sus propiedades originales. Su empleo debe ser considerado cuidadosamente, siendo importante verificar su influencia sobre otras características distintas de las que se desea modificar. Entre los aditivos más importantes se encuentran:

Incorporadores de aire: introducen microburbujas uniformemente distribuidas en la mezcla fresca mejorando su trabajabilidad. En estado endurecido aumentan la durabilidad del hormigón sujeto a ciclos de congelamiento y deshielo.

Reductores de agua: también llamados plastificantes o fluidificantes, confieren plasticidad a la mezcla permitiendo reducir el contenido de agua para un asentamiento⁹ determinado, lo cual produce hormigones más resistentes y durables. También permiten aumentar el asentamiento manteniendo el contenido de agua, en cuyo caso se obtienen mezclas más trabajables facilitando su moldeo. Los **Reductores de agua de alto rango**, también llamados superfluidificantes, permiten reducir de 3 a 4 veces más agua que los reductores normales, aumentando considerablemente la fluidez de la mezcla.

Modificadores del tiempo fraguado: los **Retardadores** se emplean para compensar el efecto acelerador de las altas temperaturas ambientales. Permiten mantener al hormigón en estado trabajable durante un tiempo mayor, prolongando el tiempo entre el mezclado y la colocación, además evita las juntas de hormigonado. Los **Acelerantes** reducen el tiempo de fraguado y aceleran el endurecimiento, por ello son especialmente aptos para el hormigonado en tiempo frío. Permiten la remoción temprana de moldes y encofrados y la reducción del período de curado.

IV. TRABAJABILIDAD Y CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN

Se entiende por **trabajabilidad** del hormigón a la facilidad con la cual la mezcla fresca puede ser mezclada, transportada, colocada, compactada y terminada con una mínima pérdida de homogeneidad, es decir con el mínimo de segregación. La mayor o menor trabajabilidad no depende sólo de las características de la mezcla sino que además es función del tipo de estructura (Ej.: edificios, pavimentos, etc), de las dimensiones de los elementos que la componen, de la densidad de armaduras, y de los métodos de transporte, colocación y compactación.

Hasta el momento no se dispone de ningún método práctico para medir la trabajabilidad, pero dado que la **consistencia**¹⁰ puede medirse en forma rápida y sencilla, se la relaciona aceptando que una mezcla de menor consistencia será más trabajable.

El método más difundido para medir dicha propiedad lo constituye el ensayo del cono de Abrams (IRAM 1536), método que mide el descenso (asentamiento) que experimenta la mezcla de hormigón fresco, compactada en un molde troncocónico, luego de retirar el recipiente que la

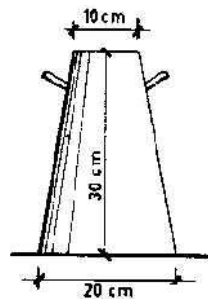
⁹ Ver punto IV.

¹⁰ Medida de la resistencia del hormigón fresco a fluir o a ser deformado, firmeza con que la que mantiene su forma.

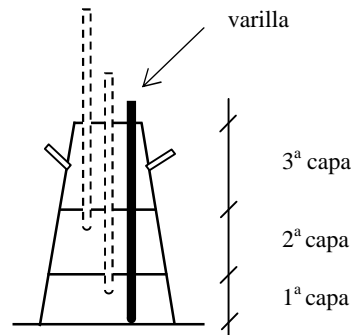
contiene. Cuanto mayor es el asentamiento tanto mayor es la fluidez de la mezcla y menor su consistencia. La consistencia plástica, con la cual se obtienen asentamientos entre 5 y 10 cm, es aquella que permite un adecuado moldeo de la mezcla y que presenta la capacidad de cambiar de forma al retirarse el molde que la contiene. Las mezclas muy secas no pueden compactarse adecuadamente con los medios convencionales, mientras que las muy fluidas tienden a segregarse.

El ensayo consiste en el llenado del tronco de cono (Fig.4a) con el hormigón fresco extraído de la hormigonera en 3 capas de igual volumen. Cada capa se punzona 25 veces con una varilla metálica de 16 mm de diámetro por 60 cm de largo, procurando distribuir uniformemente el hincado en toda la superficie y penetrar por completo la capa a compactar y sólo algo la inmediata inferior (Fig.4b). Cuando se llega al extremo superior se enrasa con cuchara y se levanta el molde en forma vertical y gradual colocándolo junto a la mezcla. Se mide el **asentamiento** en cm, como la diferencia entre la altura del molde y la de la mezcla compactada, con precisión de 0,5 cm (Fig.4c).

a)



b)



c)

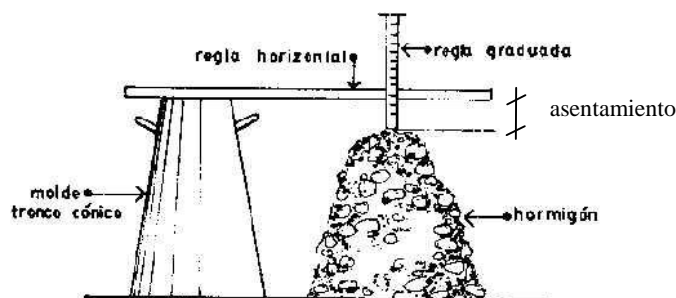


Figura 4: Ensayo de asentamiento, **a)** molde troncocónico (cono de Abrams), **b)** compactación en capas y **c)** medición del asentamiento.

Paralelamente puede apreciarse el **aspecto** deslizando suavemente el filo de la cuchara sobre la superficie lateral de la mezcla, el cual resultará arenoso si en la cuchara queda excesiva cantidad de mortero¹¹, y pedregoso si no quedan restos de mortero. El grado de **cohesión** puede evaluarse golpeando lateralmente la mezcla con la varilla. Si la mezcla se desmorona separándose los componentes entonces no tiene la cohesión necesaria para evitar la segregación. Apoyando la cuchara sobre la superficie ejerciendo una ligera presión puede verificarse si la muestra posee la necesaria cantidad de mortero para permitir una correcta **terminación**.

Como regla general, el hormigón debe proyectarse con el mínimo asentamiento que permita una correcta colocación. A modo orientativo, en la Tabla 1 se presentan valores de asentamientos asociados a distintos elementos estructurales.

Tabla 1: Asentamientos en función del tipo de estructura.

Tipos de estructura	Asentamiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Bases y muros de fundación armados	8	2
Vigas y muros armados	10	2
Columnas de edificios	10	2
Pavimentos y losas	8	2
Hormigón masivo pesado	8	2

V. RESISTENCIA

La resistencia es la propiedad más importante a considerar en el diseño y control de calidad de las estructuras. Ello se debe a que si bien en la práctica el hormigón se encuentra sometido a una combinación de esfuerzos de compresión, tracción y corte, frecuentemente se considera a los efectos del cálculo la capacidad del hormigón para soportar cargas de compresión. Sumado a esto, muchas de las propiedades del hormigón se encuentran directamente relacionadas con la resistencia.

Por todo ello, y por resultar un ensayo de relativa fácil ejecución, la resistencia del hormigón a la compresión, determinada a la edad de 28 días mediante ensayo estándar, se acepta universalmente como un índice general de la calidad del mismo.

Para determinar la resistencia a compresión se deben seguir los siguientes pasos:

Moldeo de las probetas: se toma una muestra de la hormigonera o camión mezclador, con la cual se llena, como mínimo 2 moldes, en 3 capas compactándose manualmente cada una de ellas mediante 25 punzonadas. Adicionalmente efectúan algunos golpes en la cara externa del molde a fin de cerrar oquedades y eliminar las burbujas de aire atrapadas. Otra alternativa puede ser la compactación mecánica de la mezcla en 2 capas. Luego de la compactación debe enrasarse la cara superior a fin de lograr la mayor planicidad posible.

Curado: las probetas deben permanecer durante 24 h en sus moldes, tapadas con algún cobertor de manera de aislarlas del medio. Luego se las desmolda y se las envía a un laboratorio donde se mantendrán en condiciones normalizadas de humedad y temperatura (HR:95%, T:23°C) hasta la edad de ensayo.

Encabezado: este procedimiento consiste en la colocación de material de relleno en las bases de la probeta a fin de lograr su máxima planicidad y paralelismo entre caras.

Medición de la geometría: se mide con cinta métrica la altura total y el perímetro de la probeta, con el cual se deduce el diámetro y se calcula el área de la sección transversal.

¹¹ Mezcla de cemento, arena y agua.

Ensayo: se coloca la probeta en la prensa hidráulica y se la somete a la aplicación de una carga progresivamente creciente hasta producir su rotura. El ensayo puede efectuarse sobre probetas cilíndricas, cúbicas o prismáticas. En nuestro país se realiza sobre muestras cilíndricas (norma IRAM 1546) de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (Fig.5). Existen también otras dimensiones, cuyo diámetro debe ser como mínimo de 3 veces el tamaño máximo del agregado grueso utilizado. La resistencia a compresión de cada probeta se calcula como la relación entre la carga última y la sección transversal de la muestra.

Los reglamentos modernos dividen a la estructura en lotes, que en el caso de edificios comprende a 1 o 2 niveles del mismo. Se toman 3 muestras por nivel, realizándose como mínimo un ensayo (2 probetas) por muestra a la edad de diseño. La conformidad de la resistencia se determinará para cada lote.

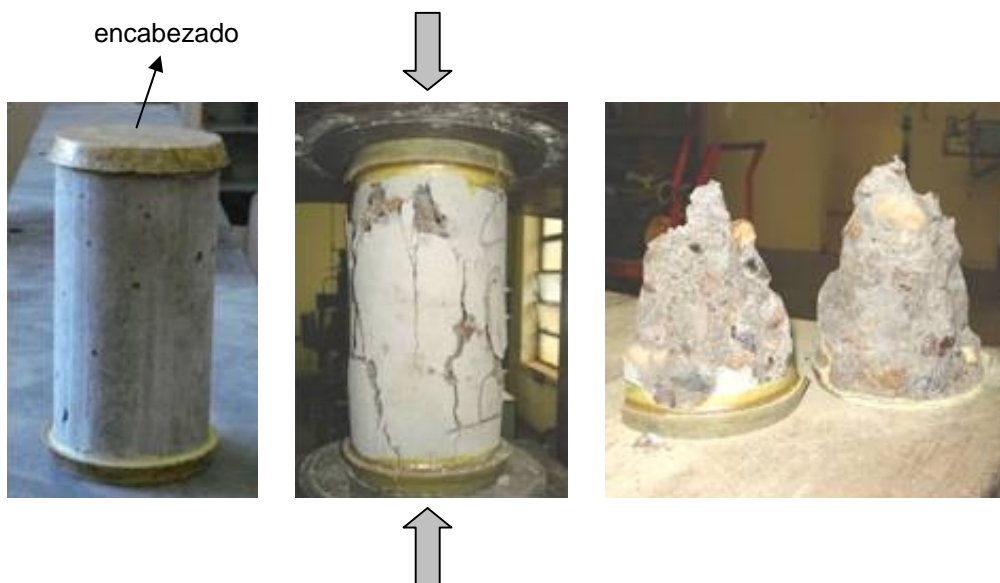


Figura 5: Ensayo de resistencia a compresión simple.

V.a. FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión es un indicador de la calidad del hormigón siendo la porosidad, la cual es función de la razón a/c^{12} y del grado de hidratación, el principal factor que gobierna el comportamiento resistente. Cuanto más poroso es un hormigón menor será su resistencia.

Los principales factores que afectan la resistencia son:

- a) edad
- b) curado
- c) razón a/c
- d) compactación
- e) calidad de los materiales componentes y dosificación
- f) temperatura de fraguado

a) El aumento de la resistencia con la **edad** se debe a la disminución de la porosidad por la ocupación de los vacíos con los productos de hidratación, los cuales se desarrollan progresivamente en el tiempo. La ganancia de resistencia se produce rápidamente al principio con una evolución más lenta luego de aproximadamente 28 días. A modo de ejemplo y en términos generales puede decirse que un hormigón elaborado con CPN, al cabo de una semana puede alcanzar el 50% de la resistencia final, el 75% durante el primer mes y cerca del 100% al año (Fig.6).

¹² Razón agua/cemento: ver V.a. punto c.

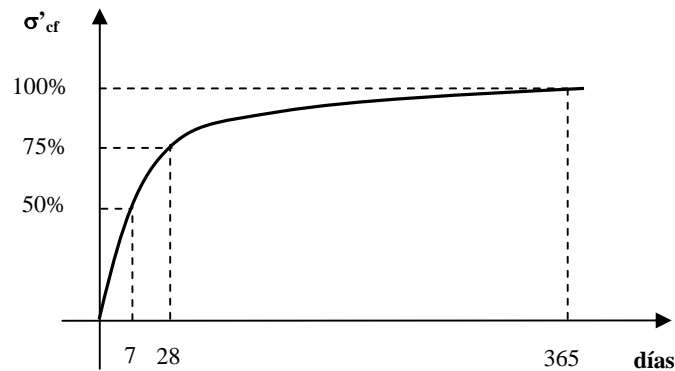


Figura 6: Evolución de la resistencia a compresión en función de la edad.

b) El **curado** es una operación de suma importancia mediante la cual se provee al hormigón de la humedad y temperatura necesarias para un adecuado desarrollo de la hidratación del cemento. Durante este período el hormigón debe mantenerse húmedo y protegido de la acción de las temperaturas extremas. El tiempo de curado es función del tipo del tipo de cemento utilizado, aunque como regla general pueden considerarse suficientes 7 días.

c) La **razón a/c** es el cociente entre el peso del agua y del cemento utilizado al dosificar un hormigón. El rango habitual de uso de dicho cociente varía entre 0,40 y 0,60. Cuanto mayor agua se emplee (a igualdad en el contenido de cemento), mayor será la razón a/c y se obtendrá un hormigón más poroso y de menor resistencia. La variación de la resistencia en función de la razón a/c puede observarse en la Fig.7.

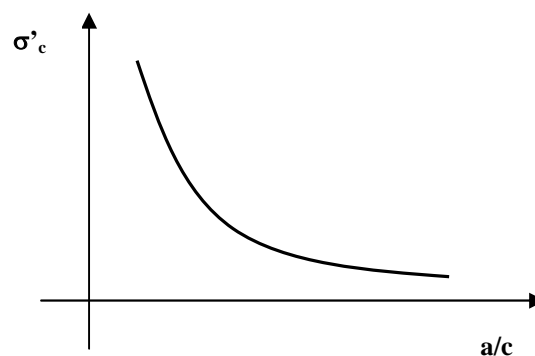


Figura 7: Variación de la resistencia a compresión en función de la razón a/c.

d) La **compactación** se realiza para facilitar el moldeo del hormigón en el interior de los encofrados y entre las armaduras y para eliminar la mayor cantidad posible de oquedades y aire atrapado que permanecen en el interior de la masa durante el colado de los distintos elementos estructurales. Se trata de una operación de suma importancia dado que la presencia de vacíos disminuye el nivel resistente.

La compactación puede realizarse por medios manuales, es decir mediante el golpeteo y apisonado de la mezcla con instrumental apropiado, o bien como se realiza actualmente por medios mecánicos. Dentro de éstos últimos se encuentran los vibradores de inmersión, vibradores de encofrado, reglas vibratoras, etc.

e) Los **materiales** deberán ajustarse a los requisitos establecidos en las respectivas normas IRAM. Deberán estar limpios, libres de impurezas y/o sustancias que puedan afectar el

comportamiento del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido. Las **proporciones** y características de los materiales empleados serán establecidas en función de las propiedades buscadas. Se debe procurar obtener una estructura pétreo donde la forma y gradación de los agregados genere una curva granulométrica continua y bien ubicada, de modo tal que dichos agregados se acomoden lo mejor posible y se combinen con la cantidad de pasta de cemento necesaria para recubrirlos. Por otro lado, el incremento en el contenido unitario de cemento y/o en su categoría generará aumentos en la capacidad resistente del hormigón.

f) El fraguado se refiere a la pérdida de plasticidad de la mezcla fresca (pasa de ser un fluido viscoso a un sólido). Las **temperaturas extremas** modifican el tiempo de **fraguado** pudiendo afectar severamente la resistencia del hormigón. La importancia de conocer el tiempo de fraguado responde a la necesidad de estimar el desencofrado y de realizar un hormigonado continuo evitando juntas de trabajo.

Las bajas temperaturas lentifican el fraguado del hormigón, pudiendo llegar a detenerlo por completo. El incremento de temperatura acelera el fraguado y endurecimiento produciendo incrementos resistentes a edades tempranas, si embargo el aumento excesivo puede producir un secado prematuro y culminar en el agrietamiento del hormigón. Por ello las especificaciones establecen que el hormigonado no debe realizarse en clima frío cuando la temperatura del hormigón sea inferior a los 5°C y en clima cálido cuando la misma supere los 30°C.

V.b. RESISTENCIA MEDIA Y CARACTERÍSTICA

El ingeniero estructuralista realiza sus cálculos considerando un valor de resistencia que luego durante la ejecución deberá ser controlada a fin de que la misma sea la especificada. Para ello se extraen muestras de la mezcla en estado fresco con las que se moldean probetas las cuales son ensayadas a compresión a una edad determinada (habitualmente a 7 y 28 días) (ver punto V).

Debido a la heterogeneidad propia del hormigón y a posibles variaciones en la ejecución, se obtienen resistencias distintas en cada probeta ensayada. Para poder establecer un único nivel resistente de referencia del hormigón se puede calcular la **resistencia media**, como el valor promedio de los resultados individuales.

$$\sigma'_{bm} = \frac{\sigma'_{b1} + \sigma'_{b2} + \dots + \sigma'_{bn}}{n}$$

donde: σ'_{bm} : resistencia media

$\sigma'_{b1}, \sigma'_{b2}, \dots, \sigma'_{bn}$: resultados individuales de los ensayos de resistencia

n : número de probetas

Sin embargo, esta medida no da una idea precisa de la homogeneidad de la calidad del hormigón ni del grado de seguridad de la estructura (ver ejemplo).

Ejemplo: Se elaboraron dos hormigones de igual nivel resistente, por cada uno de ellos se ensayaron cuatro probetas y se obtuvieron los siguientes valores de resistencia.

Hormigón 1

$$\left. \begin{array}{l} \sigma'_{b1}=24 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b2}=28 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b3}=20 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b4}=32 \text{ MPa} \end{array} \right\} \sigma'_{bm}=26 \text{ MPa} \quad (260 \text{ kg/cm}^2)$$

Hormigón 2

$$\left. \begin{array}{l} \sigma'_{b1}=24 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b2}=27 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b3}=26 \text{ MPa} \\ \sigma'_{b4}=27 \text{ MPa} \end{array} \right\} \sigma'_{bm}=26 \text{ MPa} \quad (260 \text{ kg/cm}^2)$$

Se trata de hormigones de igual resistencia media pero de diferente calidad, siendo más confiable el hormigón 2 ya que presenta una menor variabilidad en los resultados individuales. Esta menor variabilidad está asociada a un mayor cuidado y rigor en la elaboración.

Surge así el concepto de **resistencia característica**, medida estadística que tiene en cuenta no sólo el valor medio sino también la dispersión entre los valores individuales y la cantidad de probetas ensayadas. El CIRSOC 201 fija como probabilidad asociada al valor característico el 95%, lo cual significa que existe una probabilidad del 95% de que el valor obtenido al ensayar una probeta tomada al azar supere dicho valor característico. Matemáticamente la resistencia característica se calcula como:

$$\sigma'_{bk} = \sigma'_{bm} - 1,65.S$$

donde: σ'_{bm} : resistencia media
 σ'_{bk} : resistencia característica del hormigón
 S : dispersión

El parámetro S representa la dispersión, es decir el grado de variabilidad de la resistencia del hormigón y se calcula como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\sigma'_{bi} - \sigma'_{bm})^2}{n}}$$

Si el número de probetas ensayadas es menor que 30 en la fórmula anterior debe reemplazarse (n) por ($n-1$).

Reemplazando los valores del ejemplo anterior en la fórmula de S se obtiene:

Hormigón 1

$$S_1 = 5,16 \text{ MPa} \quad \longrightarrow \quad \sigma'_{bk1} = \sigma'_{bm1} - 1,65.S_1 = 26 \text{ MPa} - 1,65 \cdot 5,16 \text{ MPa} = 17,5 \text{ MPa}$$

Hormigón 2

$$S_2 = 1,41 \text{ MPa} \quad \longrightarrow \quad \sigma'_{bk2} = \sigma'_{bm2} - 1,65.S_2 = 26 \text{ MPa} - 1,65 \cdot 1,41 \text{ MPa} = 23,7 \text{ MPa}$$

Se observa que el hormigón 2 tiene menor dispersión, por lo tanto es de mejor calidad que el hormigón 1 y consecuentemente su resistencia característica es mayor.

Cuando se quiere comparar el grado de variabilidad de hormigones de distinta resistencia media, la dispersión S no resulta adecuada siendo conveniente utilizar otro parámetro denominado **coeficiente de variación** que se calcula como:

$$\delta(\%) = \frac{S}{\sigma'_{bm}} \cdot 100$$

El valor de δ está asociado al tipo de control realizado durante la elaboración del hormigón, siendo menor esta magnitud cuanto mejores son las condiciones de cuidado y control (Tabla 2).

Tabla 2: Valores de δ en función del tipo de control.

δ	%	Tipo de control
\leq	5	Laboratorio
\leq	10	Excelente
\leq	15	Bueno
\leq	20	Regular
\geq	20	Malo

La resistencia característica puede obtenerse a partir del coeficiente de variación por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma'_{bk} = \sigma'_{bm} \cdot (1 - 1,65 \cdot \delta)$$

VI. DOSIFICACIÓN

Se entiende por dosificación al proceso por el cual se establecen las proporciones relativas de los materiales componentes del hormigón, de manera tal de formular una mezcla que siendo trabajable en estado fresco, resistente y durable en estado endurecido, resulte lo más económica posible.

En la dosificación de una mezcla se tiene una primera aproximación de las proporciones relativas de los materiales, por ello deberá verificarse o reajustarse mediante pastones de prueba las cantidades calculadas analíticamente en el diseño, a fin de obtener un hormigón con las características requeridas.

Existen diversos métodos para dosificar hormigones, empíricos, semi-empíricos y racionales. En los primeros los materiales componentes se proporcionan por unidad de volumen o de peso sin tener en cuenta sus características. En las dosificaciones semi-empíricas se fija la razón a/c y estableciendo una cantidad fija de pasta se varían las proporciones de los agregados hasta obtener la consistencia deseada. En los métodos racionales además de fijar la razón a/c se determinan las cantidades óptimas de cada material en base al estudio previo de sus características físicas y mecánicas. El método racional más generalizado lo constituye el propuesto por el American Concrete Institute (ACI 211), el cual se basa en la determinación de los volúmenes absolutos de todos los componentes de la mezcla y el cálculo posterior de los contenidos en peso por unidad de volumen de hormigón, como producto de cada volumen absoluto por el peso específico respectivo.

VII. DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN

En la Fig.8 se muestra el comportamiento esfuerzo (σ)-deformación (ε) de los agregados (A), de la pasta del cemento (B) y del hormigón (C). Tanto la curva A como la B evidencian un comportamiento lineal, sin embargo la C mantiene esta tendencia hasta aproximadamente el 30% de la carga de rotura hasta donde es válida la ley de Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$). El parámetro **E**, denominado **módulo de elasticidad** caracteriza la rigidez del material, su valor se calcula como la pendiente de la curva σ - ε bajo carga uniaxial, siendo su magnitud mayor en hormigones más resistentes.

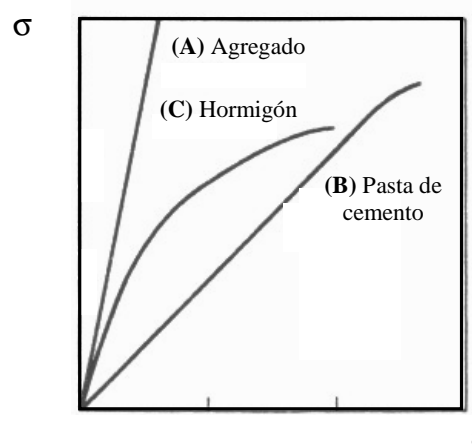


Figura 8: Comportamiento esfuerzo-deformación de: (A) agregados, (B) pasta de cemento y (C) hormigón.

Entre el 30 y el 50% de la tensión de rotura la curva se aparta ligeramente del comportamiento lineal y a partir del 50% la curvatura se hace pronunciada, dejándose de comportar elásticamente. La respuesta a este comportamiento se debe al micro-agrietamiento progresivo que experimentan las interfases¹³, matriz y agregados.

Durante el período lineal el hormigón sufre deformaciones denominadas instantáneas o reversibles, las cuales se recuperan al quitar el esfuerzo aplicado. Sin embargo en el período no lineal al quitar el esfuerzo queda una deformación remanente o irreversible denominada también plástica.

VIII. REOLOGÍA DEL HORMIGÓN. ALGUNOS FENÓMENOS

Las deformaciones que puede sufrir el hormigón ocurren como resultado de su respuesta a la acción de cargas exteriores o como consecuencia de la interacción con el medio ambiente. Los tres tipos principales de deformación que experimenta el hormigón corresponden a la deformación instantánea, la contracción y el creep.

Deformación instantánea bajo carga (ver punto VII).

El hormigón puede experimentar contracción tanto en estado fresco como en estado endurecido, la cual dependiendo de la magnitud, puede llevar a la fisuración del material. Existen distintos tipos: contracción plástica, por secado, por carbonatación y térmica, siendo las dos primeras las más frecuentes.

La **contracción plástica** es consecuencia de la pérdida de agua del hormigón en estado plástico a través de su superficie, la cual puede producirse por evaporación en ambiente de humedad inferior a la de saturación y/o por la succión ejercida por otras superficies de contacto como por ejemplo encofrados.

Lo fundamental para reducir la contracción plástica es el mantenimiento constante de la superficie en estado húmedo evitando la migración del agua a través del hormigón previo a su curado. Son contraproducentes condiciones de baja humedad relativa, velocidad elevada del viento y elevadas temperaturas, tanto del ambiente como del hormigón.

La **contracción por secado** constituye el fenómeno de contracción más importante, se produce en estado endurecido como consecuencia de la evaporación del agua adsorbida en la pasta de cemento debido a la diferencia de humedad relativa entre el hormigón y el medio exterior. Para reducir la fisuración por contracción por secado se requiere protección inicial y curado, y fundamentalmente medidas en el proyecto estructural (distribución de armaduras y juntas).

La **deformación diferida o creep** es un fenómeno de deformación lenta y progresivamente creciente, debido a la remoción del agua adsorbida como consecuencia de la acción de una carga sostenida en el tiempo. Los factores que afectan al creep son los mismos que en el caso de contracción por secado, solo que aquí la magnitud de la deformación dependerá además del nivel y duración del esfuerzo aplicado, y de la edad del elemento al momento de la aplicación de la carga.

Así como el hormigón se contrae por pérdida de humedad, también sufre **expansión** o hinchamiento cuando se halla en contacto con una fuente de humedad como en el caso de elementos sumergidos. Esta deformación se incrementa con el tiempo hasta hacerse asintótica.

¹³ Zona de transición entre agregados y pasta, representa el punto más débil del compuesto.

IX. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

Se dice que una estructura es durable cuando conserva durante su vida útil las características de seguridad (resistencia), funcionalidad y estética para las que fue proyectada, sin costos inesperados de mantenimiento o reparación.

En general si la estructura fue adecuadamente proyectada, correctamente diseñada desde el punto de vista tecnológico, y construida respetando las reglas del arte, se comportará satisfactoriamente durante su vida útil. Si embargo, a pesar de construirse respetando los requerimientos resistentes exigidos en las reglamentaciones, las estructuras pueden manifestar signos de deterioro antes de la finalización de su vida útil.

Las causas de estos deterioros pueden tener origen en distintas patologías directamente asociadas a su interacción con el medio externo, entre las cuales se destacan: la corrosión de las armaduras, la reacción álcali-sílice, el ataque por sulfatos, congelación y deshielo, y la acción de medios ácidos, entre otros.

En la mayoría de los casos los procesos de degradación están vinculados al ingreso, desde el medio externo, de líquidos y sustancias agresivas a través de la estructura porosa del material (Fig.9). Dicho ingreso se produce por distintos mecanismos de transporte (capilaridad, permeabilidad, difusión, etc.) y su circulación a través de la red de poros puede conducir el movimiento de otras sustancias agresivas.

De allí la importancia de la calidad y espesor del hormigón de recubrimiento, debido a que el mismo constituye la barrera física entre el medio externo y el hormigón interior. Además, el hormigón provee al acero de un medio alcalino que le permite crear una capa protectora sobre su superficie, la cual lo mantiene protegido durante un tiempo determinado.

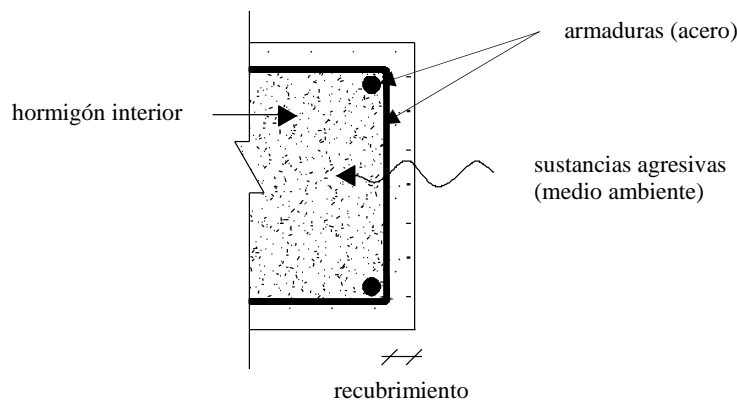


Figura 9: Ingreso de sustancias agresivas desde el medio externo.

La corrosión de armaduras reviste particular interés por ser una de las patologías más frecuentes. Este fenómeno puede darse en ambientes marinos, por la penetración de cloruros que al superar una determinada concentración provocan el picado del acero (Fig.10a), o bien por el ingreso del dióxido de carbono atmosférico que al carbonatar al hormigón de recubrimiento afecta la capa de protección del acero (Fig.10b). La oxidación conduce a la fisuración del hormigón de recubrimiento debido a la presión ejercida por la herrumbre, generando nuevas vías de acceso de los agentes agresivos externos. Avanzado el proceso, el acero comienza a “escamarse” pudiendo llegar a sufrir una pérdida importante de su sección útil. El incremento del volumen de los productos de reacción puede culminar en el desprendimiento del recubrimiento dejando expuesta la armadura, acelerándose aún más el proceso de destrucción.

a)



b)



Figura 10: Corrosión del acero: **a)** por ingreso de cloruros en ambiente marino, **b)** por carbonatación en ambiente rico en dióxido de carbono (cochera subterránea).

En base a lo expuesto, las acciones tendientes a la obtención de obras durables convergen al diseño de hormigones lo más “impermeables” posible, lo cual se consigue mediante el empleo de razones a/c bajas, de aditivos químicos, adiciones minerales y adecuadas tareas de colocación, compactación y curado. Por otro lado, deberán respetarse los espesores mínimos de recubrimiento de cada elemento estructural en función del ambiente de exposición (Tabla 3). La Tabla 3 corresponde a las clases de exposición A1 (ambiente seco) y A2 (ambiente con humedad media), para clases de exposición más severas los recubrimientos tabulados deben incrementarse entre el 30 y el 50% dependiendo del nivel de agresividad del medio.

Tabla 3: Espesor mínimo de recubrimiento para ambientes A1 y A2 (CIRSOC 201).

Condición	Rec. Mín. (mm)
Bases de fundación	50
H° en contacto con el suelo o expuesto al aire	
barras $d > 16$ mm	35
barras $d \leq 16$ mm	30
H° no expuesto al aire ni en contacto con el suelo	
<i>Losas, tabiques</i>	
barras $d > 32$ mm	30
barras $d \leq 32$ mm	20, d
<i>Vigas, columnas</i>	
A° ppal	$=d, \geq 20$ y 40
Estribos	20
Zunchos	40

d: diámetro de la barra de acero.

X. REFERENCIAS

- Becker, E. “Cemento Pórtland” - Características y Recomendaciones de Uso”. Loma Negra C.I.A.S.A. 2000.
- Castiarena, A., N., “Curso de Tecnología del Hormigón”. ISBN 950-99797-0-2. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. 1994.
- Mehta, K., Monteiro, P. J. M., “Concreto. Estructuras, propiedades y materiales”. ISBN 968-464-083-8. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1998.

- Mindess, S., Young, J. F., “Concrete”. ISBN 0-13-167106-5. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 1981.
- Neville, A. M., “Tecnología del Concreto”. Tomo I. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1977.
- Neville, A. M., “Tecnología del Concreto”. Tomo II. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1977.
- Taus, V. L., “Evaluación Parámetros relacionados con la Durabilidad del Hormigón”. Hormigón Nro 40 (2004), pp. 51-60.
- Taus, V. L., “Caracterización de la Estructura Porosa del Hormigón”. Ciencia y Tecnología del Hormigón Nro 11 (2004), pp. 49-58. L.E.M.I.T.
- Taus, V. L., Villagrán, Y.A. and Di Maio A.A., “Curing Conditions Influence on Transport Properties of Blended Cement Concrete (BCC)”. V HPC International ACI / CANMET Conference "Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing". Manaus, Brazil. Junio de 2008.