

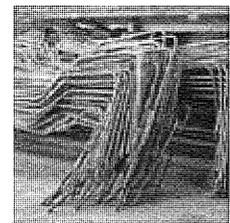
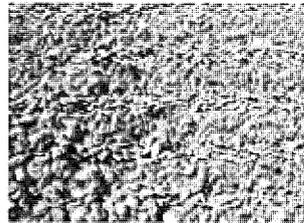
XXIII. *La habilidad de moldearse...*

Tecnología de los materiales

1. Introducción

Cuando se proyecta una estructura de hormigón armado se establecen las dimensiones de los elementos, el tipo de hormigón, los aditivos, y el acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá soportar y de las condiciones ambientales a que estará expuesto.

El **hormigón**, también denominado **concreto**, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro conglomerante) con áridos (grava, gravilla y arena) y agua.



El cemento, mezclado con agua, se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo. La mezcla de cemento con agua se denomina pasta cementicia.

Los áridos proceden de la desintegración o trituración, natural o artificial de rocas y, según la naturaleza de las mismas, reciben el nombre de áridos silíceos, calizos, graníticos, etc. El árido cuyo tamaño es superior a 5 mm se llama árido grueso o grava, mientras que el inferior a 5 mm se llama árido fino o arena. La mezcla de cemento con arena y agua se denomina mortero.

El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que lo convierten en un producto maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia pétreo.

La pasta cementicia es la que confiere al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación en el fraguado y endurecimiento.

Una característica importante del hormigón es poder adoptar formas distintas, a voluntad del proyectista. Al colocarse en obra es una masa plástica que permite rellenar un molde, previamente construido con una forma establecida, que recibe el nombre de encofrado

Además, para poder modificar algunas de sus características o comportamiento, se pueden añadir aditivos y adiciones, existiendo una gran variedad de ellos: colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, fibras, aire, etc.

Resumiendo:

cemento	pasta cementicia	mortero	hormigón simple	hormigón armado
adiciones activas				
adiciones inertes				
agua	agregado fino	agregado grueso	acero	
	aditivos			
	aire			
	natural			
	intencional			

2. Breve reseña histórica del hormigón estructural

La palabra **Hormigón** procede del término *formicō*, palabra latina que alude a la cualidad de moldeable o "dar forma". El término **concreto** también es originario del latín: *concretus*, que significa "crecer unidos". Su uso en idioma español se transmite por vía de la cultura anglosajona, siendo la voz inglesa original: *concrete*

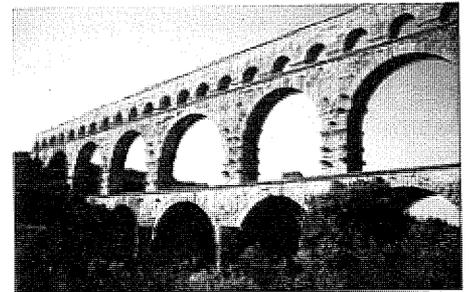
Cuando el hombre optó por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos mampuestos para poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante las inclemencias atmosféricas. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen fácilmente.

Así, en el Antiguo Egipto, hace 5000 años se utilizaron diversas pastas obtenidas con mezclas de yesos y arcillas calcinadas que luego de mezcladas con agua, endurecen al aire. Se utilizaron para poder unir sólidamente los sillares de piedra, como las que aun perduran entre los bloques calizos del revestimiento en la pirámide de Keops.



En la Antigua Grecia, hacia el año 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer hormigón (hidráulico) de la historia.

Los antiguos romanos emplearon tierras o cenizas volcánicas, conocidas también como puzolana, que contienen sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal daban como resultado el denominado cemento puzolánico, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio de donde surge el nombre de "Puzolana" o "tierra romana".



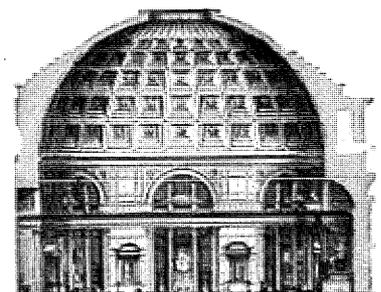
.Añadiendo en su masa jarras cerámicas o materiales de baja densidad (piedra pómez) obtuvieron el primer hormigón aligerado. Con este material se comenzó por construir por sobre todo tuberías e instalaciones portuarias, fabricaciones las cuales se han encontrado restos hasta el día de hoy.

Se destacan construcciones como los diversos arcos del Coliseo romano y la cúpula del Panteón de Agripa, de unos cuarenta y tres metros de diámetro, la de mayor luz durante siglos. Esta cúpula fue edificada en el siglo II y ha resistido diecinueve siglos sin reformas o refuerzos. El grueso anillo murario es de *opera latericia* (hormigón con ladrillo) y la cúpula se aligeró utilizando piedra pómez como árido. Se construyó vertiendo hormigón en las juntas entre mampuestos y dejándolo endurecer.



Vitruvio en su tratado de construcción "De Architectura" del año 50 a C describe los procedimientos romanos para fabricar "hormigones".

Tras la caída del Imperio romano, el hormigón fue poco utilizado, posiblemente debido a la falta de medios técnicos y humanos, la mala calidad de la cocción de la cal, y la carencia o lejanía de tobas volcánicas.



El Panteón: su cúpula esférica de casi 50 m de diámetro

En algunas ciudades y grandes estructuras, construidas por Mayas y Aztecas en México o las de Machu Pichu en el Perú, se utilizaron materiales cementantes.

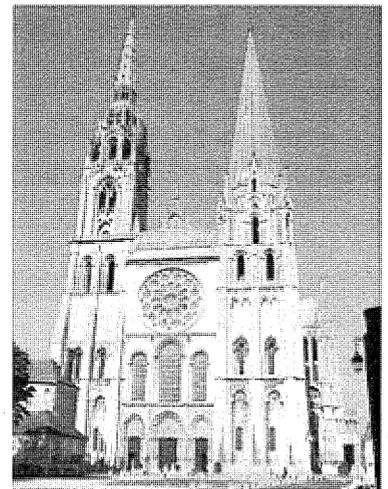
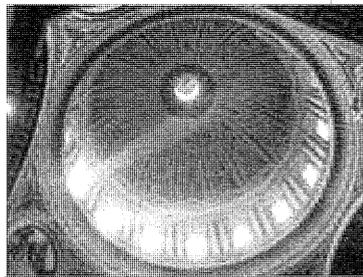
En 1796 James Parker patenta un ligante hidráulico en Inglaterra, al que denomina "cemento romano".

Joseph Aspdin patenta en 1824 el *Portland Cement*, obtenido de caliza arcillosa y carbón calcinados a alta temperatura, denominado así por su color gris verdoso oscuro, muy similar a las rocas de la isla de Pórtland, en el condado de Dorset. Isaac Johnson obtiene en 1845 el prototipo del cemento moderno elaborado de una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura (clinkerización).

La invención del hormigón armado se suele atribuir al constructor William Wilkinson, quien solicitó en 1854 la patente de un sistema que incluía armaduras de hierro para "la mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego".

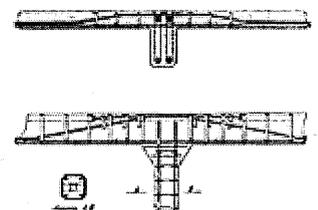
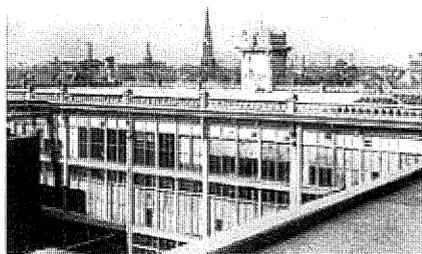
Pero la idea de incorporar elementos resistentes a tracción a los materiales frágiles data ya desde antiguas construcciones donde para lograr este objetivo incorporaban maderos en los muros de adobe o piedra. En el siglo XII se colocaron cadenas metálicas en la catedral de Chartres (Francia) para contrarrestar esfuerzos que la mampostería de los arbotantes góticos no podía tomar.

En el siglo XVI, en la cúpula de la basílica de San Pedro, construida por Miguel Ángel, aparecieron fisuras verticales en su mitad inferior producidas por esfuerzos de tracción, poco después de haberse concluido. La solución, que aún hoy perdura, fue atar la base de la cúpula con varias vueltas de cadena.



El francés Joseph Monier, jardinero de Versalles, construía macetas de hormigón armado, del tipo de las que contienen los naranjos en los jardines del Palacio, para sustituir a las de madera que duraban muy poco. Así patentó varios métodos en la década de 1860.

Pero fue François Hennebique quien ideó un sistema convincente de hormigón armado, patentado en 1892, que utilizó en la construcción de una fábrica de hilados en Tourcoing, Lille, en 1895. Esta patente mostraba su método de hacer los nudos para conseguir un sistema monolítico de hormigón armado.



Hennebique y sus contemporáneos basaban el diseño de sus patentes en resultados experimentales, mediante pruebas de carga; los primeros aportes teóricos los realizan prestigiosos investigadores alemanes.

Auguste Perret fue pionero en el empleo constructivo del hormigón armado, como muestra el edificio de viviendas de la rue Franklin (1902-1903) en París, la primera obra residencial construida en este material. Perret siempre intentó mostrar de una forma expresiva la estructura de sus edificios. Fig. a En el diseño de *Casa Domino* de 1914 de Le Corbusier, la estructura está conformada con pilares y forjados de hormigón armado, posibilitando fachadas totalmente diáfnas y la libre distribución de los espacios interiores. Fig b

En 1929, surge el proyecto del primer rascacielos en hormigón (sin ejecutar) de Frank L. Wright. Fig c



Fig. a

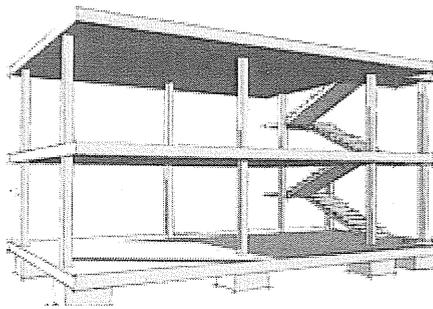


Fig. b

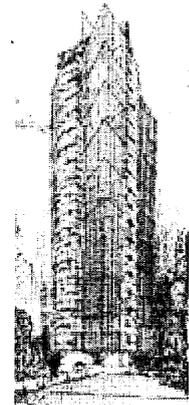


Fig. c

En 1928 E Freyssinet, habiendo desarrollado estudios sobre la fluencia del hormigón, registró su primera patente y estableció su teoría de hormigón pretensado. El título de su publicación fue “Una revolución en el arte de construir”.

El primer encargo importante para Pier Luigi Nervi fue en 1929, el estadio Giovanni Berta de Florencia. El mismo se compone de vigas en voladizo que sostienen una arriesgada cubierta de hormigón visto.

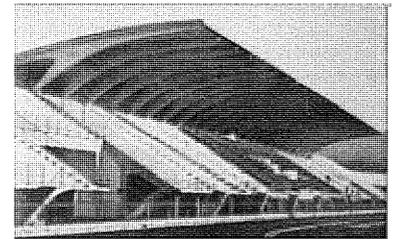
En 1935, Eduardo Torroja alcanza 13 metros de vuelo y 5cm de espesor en los extremos de la cubierta de la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela., en Madrid.

Los grandes progresos en el estudio científico del comportamiento del hormigón armado, los avances tecnológicos y su evolución en el cálculo, se describirá en próximos capítulos.

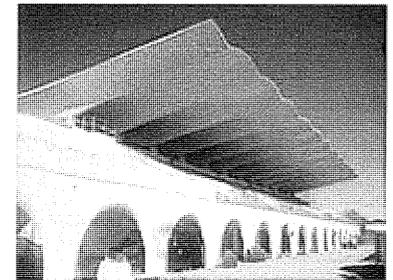
Su empleo resulta hoy insustituible en edificios que deban albergar multitudes: estadios, teatros, cines, etc. Muchas ciudades compiten por erigir la edificación de mayor dimensión, o más bella, como símbolo de su progreso que, normalmente, está construida en hormigón armado.

El Burj Khalifa, conocido durante su construcción como Burj Dubai, es un rascacielos que se encuentra situado en el distrito *Downtown Burj Khalifa* de la ciudad de Dubái, en Emiratos Árabes Unidos.

Es la estructura más alta construida por el hombre hasta hoy (818 metros). La construcción comenzó el 21 de septiembre de 2004, y su inauguración oficial fue el 4 de enero de 2010.



Estadio de Florencia



Hipódromo de la Zarzuela



3. Los constituyentes del hormigón armado

3.1. El cemento

3.1.1. Generalidades

El cemento es un ligante hidráulico, o sea una sustancia que mezclada con el agua, está en condiciones de endurecer ya sea estando expuesta al aire libre, como así también debajo del agua. La piedra de cemento en vía de formación presenta resistencias elevadas y no se disuelve en el agua.

En Argentina los cementos responden a las exigencias de las normas IRAM y el reglamento CIRSOC establece:

Requisitos generales

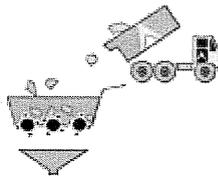
Para la **ejecución de estructuras** de hormigón simple, armado o pretensado, se deben utilizar **cementos de marca y procedencia aprobada por los organismos nacionales habilitados**. El cemento a utilizar debe cumplir con los requisitos especificados, para su tipo, en la norma IRAM 50 000-00.

3.1.2. Fabricación

El primer paso consiste en la extracción de la cantera de la materia prima: la **piedra caliza**, mediante la utilización de explosivos. Así es cargada en volquetes de 50 toneladas y transportada hasta la planta de trituración. La piedra bruta es pretriturada en la cantera hasta el tamaño de un puño.

En la segunda etapa el material que se encuentra en el molino es secado y triturado en fino polvo. A la salida se obtiene la harina cruda que será mezclada en las proporciones correspondientes a la composición química óptima en los silos de homogeneización.

Para producir una tonelada de cemento es necesario utilizar por lo menos una tonelada y media de materia prima (calcáreos y arcilla que liberan agua y dióxido de carbono durante la cocción).



Materiales calcáreos 65%		Materiales arcillosos 35%	
Oxido de cal	CaO	Oxido de hierro ₃	Fe ₂ O ₃
Magnesia	MgO	Alcalis	Na ₂ O; K ₂ O
Alúmina	Al ₂ O ₃	Sílice	SiO ₂

La siguiente operación es la principal en la fabricación del cemento. Consiste en la cocción de la harina a una temperatura de aproximadamente 1450° C. Ahora el material se presenta bajo la forma de **clinker** incandescente que será bruscamente enfriado a la salida del horno, para mantener sus propiedades. El clinker portland es el principal componente del cemento portland y presenta los siguientes compuestos básicos:

- Silicato tricálcico (SiCa₃)
- Silicato dicálcico (SiCa₂)
- Aluminato tricálcico (AlCa₃)
- Ferroaluminato tetracálcico (FeAlCa₄)



Donde los silicatos (SiCa₃ y SiCa₂) son los componentes principales ya que suman alrededor del 80 % de los compuestos y son los responsables del desarrollo de **resistencia** del cemento portland. Mientras que el SiCa₃ actúa sobre el desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días, el SiCa₂ presenta una hidratación algo diferida y actúa sobre la resistencia final.

El AlCa₃ que se encuentra en pequeñas cantidades acelera el **tiempo de fragüe** y la resistencia a primeras horas del hormigón. Su presencia hace vulnerable al hormigón a la acción de los sulfatos. El FeAlCa₄ se considera casi un subproducto de la fabricación de clinker y actúa principalmente sobre la **coloración** del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos.

Luego el clinker es molido con una pequeña cantidad de **yeso**, que es un regulador del tiempo fraguado (endurecimiento). Según el tipo de cemento se agregan al clinker, durante la molienda, compuestos minerales (calcáreos, puzolana, escoria de alto horno, cenizas volantes) para formar los llamados cementos Pórtland con adiciones.

3.1.3. Adiciones minerales

Las adiciones minerales (diferentes a los aditivos) son compuestos naturales o artificiales que se incorporan al cemento o directamente al hormigón con el objeto de mejorar el comportamiento del cemento u hormigón en estado fresco y/o endurecido.

A. Escoria granulada de alto horno

Es un subproducto de la fabricación del hierro y posee una composición química parecida al clinker portland. Cuando se la granula, mediante el enfriamiento violento, sus minerales componentes permanecen en un estado vítreo (no cristalino), lo cual le confiere hidraulicidad, es decir que endurece en contacto con el agua.

B. Puzolanas

Son minerales naturales o artificiales en los que predominan la sílice amorfa y la alúmina. Las puzolanas naturales son rocas de origen volcánico o de naturaleza orgánica de origen sedimentario (dolomitas). Las puzolanas artificiales son generadas por las industrias: las cenizas volantes (fly ash) y humos de sílice (silica fume). En nuestro país se utilizan mayoritariamente puzolanas naturales. Mejoran la resistencia a los sulfatos, reducen la permeabilidad, la actividad de los álcalis y el calor de hidratación.

C. Filler Calcáreo

Es un mineral compuesto básicamente por carbonato de calcio que, dada su facilidad de molienda, se adiciona al cemento o se muele en forma conjunta con el clinker Portland. Debido a su pequeño tamaño las partículas de filler calcáreo suelen mejorar la distribución granulométrica del cemento mejorando la trabajabilidad.

3.1.4. Selección del tipo de cemento

A. Cementos de Uso General

Son aquellos cementos utilizados en la elaboración de hormigones que serán colocados en elementos estructurales simples o armados donde **no se requieran propiedades especiales** del cemento debido a cuestiones de durabilidad, resistencia temprana del hormigón o importancia del color en elementos estructurales y/u ornamentales, entre otros.

En Argentina, los cementos de uso general deben cumplir los requerimientos de la norma IRAM 50.000 que especifica los siguientes materiales:

Tipo de Cemento	Nomenclatura	Composición [g / 100 g]			
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)
Cemento portland normal	CPN	100 - 90		0 - 10	
Cemento portland con "filler" calcáreo	CPF	99 - 80			1 - 20
Cemento portland con escoria	CPE	89 - 65		11 - 35	
Cemento portland compuesto	CPC	98 - 65	2 ó más, con P + E + F 35		
Cemento portland puzolánico	CPP	85 - 50	15 - 50		
Cemento de alto horno	CAH	65 - 25		35 - 75	

En la Tabla, puede observarse que cada tipo de cemento, puede reconocerse por 3 letras que brindan al usuario cierta información acerca de la composición con la cual se elabora.

Estos cementos son conocidos como "**Cementos con adiciones minerales**".

CPN - Cemento Portland Normal

Puede decirse que este cemento portland es apto para todo tipo de construcción que no requiere propiedades especiales por cuestiones de resistencia y/o durabilidad. Se permite la incorporación de hasta un 10 % de escoria granulada de alto horno para este tipo de cemento.

CPF - Cemento Portland con "filler" calcáreo

Al igual que el cemento portland normal, este material es utilizado en la construcción cuando el hormigón no presenta requerimientos especiales. La característica más valorada de este material es la buena trabajabilidad que le confiere a los morteros y hormigones cuando se trabajan en estado fresco. Como contrapartida, al estar fabricado con adiciones no activas, la resistencia final de los hormigones elaborados con este material suele ser menor a la que se obtendría con otros tipos de cemento.

CPE - Cemento portland con escoria

Es un cemento con contenido de escoria "moderado" ya que presenta mayor contenido que el cemento portland normal y menor que el cemento de escoria de alto horno. Puede utilizarse para cualquier tipo de construcción y es especialmente recomendado cuando se tiene ataque moderado de sulfatos, posibilidad de utilización de agregados reactivos (previo ensayo) o se requieren buenas condiciones de impermeabilidad del hormigón.

CPC - Cemento Portland Compuesto

Es un cemento que combina los efectos benéficos del "filler" calcáreo de excelente trabajabilidad en estado fresco, con la mayor resistencia final y durabilidad de los cementos con adiciones activas. Esta combinación hace que se obtengan cementos de muy buenas características técnicas.

CPP - Cemento Portland Puzolánico

Cuando mayor sea el contenido de la puzolana (adición activa) de este cemento, es de esperar que su hidratación sea más "lenta" y consecuentemente también lo sea el desarrollo de resistencia. Generalmente los hormigones elaborados con este tipo de cementos obtienen altas resistencias finales y puede apreciarse cuando se ensayan probetas luego de 56 o 90 días de edad. Si bien este cemento es apto para casi cualquier tipo de obra, es especialmente recomendado cuando se requieran propiedades especiales de durabilidad como ataque de sulfatos, bajo calor de hidratación, inhibición de la reacción álcali – agregado, impermeabilidad, etc.

CAH - Cemento de alto horno

Este cemento, que en la norma pierde la denominación "portland", posee un alto contenido de una adición activa como lo es la escoria granulada de alto horno. Es muy utilizado en obras de ingeniería donde interesa fundamentalmente el bajo calor de hidratación y una buena resistencia a sulfatos en caso de una exposición a aguas o suelos sulfatados y/o a la reacción álcali – agregado en caso de utilizarse agregados potencialmente reactivos. Es de esperar un desarrollo de resistencia un tanto más "lento" que el cemento normal. No obstante la resistencia final de los hormigones elaborados a partir de este tipo de cemento suele ser mayor a la obtenida con CPN utilizado en dosis similares.

B. Cementos con Propiedades Especiales

Se utilizan cuando se requieren otras propiedades especiales en el hormigón, adicionalmente a los requisitos de los cementos de uso general.

En cuanto a la nomenclatura, la norma IRAM 50.001 especifica los requisitos "especiales" aunque la composición del cemento está especificada en la norma IRAM 50.000, indicándose en primera instancia el tipo de cemento y luego el requisito "especial" que cumple si correspondiese. De esta manera surgen los cementos: CPN (ARI), CPN (MRS), CPN (ARS), CPE (RRAA), CPP (ARS, BCH, RRAA), etc.

- **ARI** - de alta resistencia inicial
- **MRS** - moderadamente resistente a los sulfatos
- **ARS** - altamente resistente a los sulfatos
- **BCH** - de bajo calor de hidratación
- **RRAA** - resistente a la reacción álcali – agregado
- **B** - blanco

ARI - de Alta Resistencia Inicial

Es recomendado cuando los hormigones deben tener importantes niveles de resistencia temprana por razones de proyecto o constructivas. En general su utilización se limita a aquellos usos donde se necesita habilitar rápidamente la estructura o se utiliza tecnología de encofrado deslizante o se requiere una rápida reutilización de los encofrados.

Es de esperar que los hormigones elaborados con este cemento obtengan resistencias a 7 días similares o mayores a las que se obtendrían utilizando la misma dosificación con cualquier cemento portland de categoría CP40 a los 28 días de edad. Debido a que este cemento desarrolla alto calor de hidratación no se recomienda en elementos estructurales cuya menor dimensión lineal sea mayor a los 40 cm. En el mercado este tipo de cemento se conoce con la denominación Súper, Extra o ARI.

MRS - moderadamente Resistente a los Sulfatos

Es recomendado cuando los hormigones serán sometidos a agresión por sulfatos. Es un cemento al cual se le limita el contenido de aluminato tricálcico a valores menores o iguales al 8 % en masa, lo cual hace a este material apto para utilizarlo cuando existe un ataque moderado de sulfatos o será utilizado en hormigones de estructuras en contacto directo con agua de mar.

ARS - altamente Resistente a los Sulfatos

Es el cemento conocido como ARS. La norma IRAM limita el contenido de aluminato tricálcico a un máximo de 4 % en masa y la suma de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico debe ser menor o igual a 22 %, calculados teóricamente de acuerdo a la composición química. Su utilización se limita para estructuras sometidas al ataque fuerte de sulfatos presentes en ciertas aguas y/o suelos de contacto.

BCH - de Bajo Calor de Hidratación

Es recomendado cuando se construyen secciones cuya menor dimensión lineal es 75 cm y existe riesgo de fisuración del hormigón por efectos térmicos.

Generalmente este tipo de cementos se comercializa en combinación con cementos portland con adiciones activas como son la escoria granulada de alto horno y la puzolana. Se utiliza cuando interesa que el hormigón desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento, como es el caso de las presas de hormigón o bases de grandes dimensiones.

RRAA - Resistente a la Reacción Álcali – Agregado

Es recomendado cuando se construirá un elemento en hormigón que será sometido en forma constante a humedad y se utilizarán agregados que fueron identificados como potencialmente reactivos.

Existen en nuestro país algunas pocas fuentes de agregados que presentan potencialidad de reaccionar desfavorablemente con los álcalis del cemento en estructuras sometidas a condiciones de humedad en forma más o menos permanente. Si bien es recomendable utilizar agregados que no sean potencialmente reactivos para la elaboración del hormigón, existen casos que esto resulta económicamente inviable y se recurre a cementos con bajos contenidos de álcalis o que posean alguna adición activa que demuestre su capacidad de inhibición o, al menos, "amortiguar" los efectos de la expansión de manera que la reacción no resulte deletérea.

B - Blanco

Es recomendado cuando se necesita elaborar un hormigón blanco en cuyo caso se deberá utilizar un cemento portland blanco en forma conjunta con agregados de coloración clara.

Es un cemento que cumple los requerimientos de los cementos CPN o CPF o CPC y tiene como requisitos adicionales la limitación de los contenidos de óxido férrico y magnesio que actúan sobre el color del material. También, se incorporó un requisito de blancura que resulta de fundamental importancia para el usuario de este tipo de cemento. Es un material que en nuestro país no esta muy

difundido debido a su alto costo y su utilización se restringe a hormigones ornamentales o “a la vista” y cierto tipo de mosaicos o baldosas. No hay que confundir con otros cementos blancos utilizados en la fabricación de ciertas pastinas o algunas baldosas que utilizan cementos con altos contenidos de adiciones activas y no activas que no cumplen los requisitos de resistencia establecidos por IRAM para el cemento portland blanco.

	Normal	MRS	ARI	BCH	ARS
SiCa ₃	50	46	56	30	43
SiCa ₂	25	29	15	46	36
AlCa ₃	12	6	12	5	4
FeAlCa ₄	8	12	8	13	12
Yeso	3	3	4	3	3

Valores en %

Estos cementos suelen denominarse “puros” debido a que su composición surge de la molienda conjunta de clinker portland y pequeñas cantidades de sulfatos de calcio (yeso), y no poseen adiciones minerales.

- CPN - Cemento portland normal
- CPN (ARI) - Cemento portland normal, de alta resistencia inicial
- CPN (MRS) - Cemento portland normal, moderadamente resistente a los sulfatos
- CPN (ARS) - Cemento portland altamente resistente a los sulfatos sin adiciones
- CPN (BCH) - Cemento portland normal, de bajo calor de hidratación
- CPN (RRAA) - Cemento portland normal, resistente a la reacción álcali – agregado

Resulta algo extraño que el cemento portland normal (CPN) aparezca en la clasificación como “puro” y con adiciones minerales, esto se debe a que la norma IRAM 50.000 permite la incorporación de hasta un 10 % de escoria granulada de alto horno para este tipo de cemento.

3.1.5. Clasificación de los cementos por Nivel de Resistencia

Es conocido que la resistencia del hormigón depende, en primera instancia, de la relación a/c (agua / cemento) y, en segunda instancia de otros factores entre los que se encuentra la resistencia del cemento utilizado, la calidad de los agregados, etc.

A los cementos se los clasifica en tres categorías, según su resistencia mecánica a la compresión, expresada en Mpa

CP30 – CP40 – CP50.

Los dígitos indican la resistencia mínima a la compresión a los 28 días que debe ser garantizada por el fabricante, determinada sobre probetas de mortero de cemento.

En todos los casos –salvo en el cemento portland de alta resistencia inicial donde la norma requiere valores de resistencia a 1, 2, 3, 7 y 28 días- los cementos son categorizados por su resistencia de acuerdo a la siguiente tabla:

Categoría de Cemento	Resistencia a Compresión				Método de Ensayo
	2 días	7 días	28 días	28 días	
CP 30	-	≥ 16 MPa	≥ 30 MPa	≤ 50 MPa	IRAM 1622
CP 40	≥ 10 MPa	-	≥ 40 MPa	≤ 60 MPa	
CP 50	≥ 20 MPa	-	≥ 50 MPa	-	

Así, si se quiere producir un Hormigón de Alto Desempeño, será más fácil lograrlo a partir de un cemento CP50.

La industria del Hormigón elaborado, utiliza generalmente CP40 para sus formulaciones.

Los CP30 son elegidos para hormigones convencionales. También esta categoría suele resultar conveniente cuando por algún motivo (durabilidad) se especifique un alto contenido de cemento, sin necesidad de alcanzar altas resistencias.

- Designación de los cementos para uso general

Ejemplos:

CPN 50 Cemento Pórtland Normal, Categoría 50.
CPF 40 Cemento Pórtland con Filler Calcáreo, Categoría 40.

Las tres letras indican el tipo de cemento; los dos dígitos, la categoría de resistencia a la que pertenece el cemento (30, 40 ó 50 MPa).

- Designación de los cementos especiales

Ejemplos:

CPN 50 (ARI) Cemento Pórtland Normal, Categoría 50, de Alta Resistencia Inicial.
CPP 40 (ARS, BCH, RRAA) Cemento Pórtland Puzolánico, Categoría 40, Altamente Resistente a los Sulfatos, de Bajo Calor de Hidratación y Resistente a la Reacción Álcali-Agregado.

Las tres letras iniciales indican el tipo de cemento, referido a su composición; los dos dígitos, la categoría de resistencia a compresión a la que pertenece el cemento (30, 40 ó 50); la serie de letras entre paréntesis, separadas por comas, indica la ó las propiedades especiales que posee el cemento.

3.1.6. Almacenamiento y conservación del cemento en bolsas

El almacenamiento del cemento embolsado debe hacerse en un depósito cerrado impermeable. Se recomienda observar las siguientes reglas:

- Apilar las bolsas sobre una plataforma elevada sobre el piso del local, y separar las pilas de las paredes.
- Apilar las bolsas de modo de minimizar la circulación de aire entre ellas.
- Cubrir las pilas con láminas de plástico resistente.
- Almacenar las bolsas de modo de ir utilizándolas en el mismo orden en que las fue recibiendo.
- Evitar períodos de almacenamiento superiores a los 60 días.
- No arrojar las bolsas desde lo alto ni arrastrarlas por el piso
- Las bolsas inferiores pueden presentar grumos blandos de compactación.

3.2. EL agua de amasado

Se entiende por agua de amasado la cantidad de agua total contenida en el hormigón fresco. Esta cantidad es utilizada para el cálculo de la relación agua/cemento (A/C).

El agua de amasado está compuesta por:

- El agua agregada a la mezcla.
- Humedad superficial de los agregados.
- Una cantidad de agua proveniente de los aditivos.

El agua de amasado cumple una doble función en la tecnología del hormigón: por un lado permite la hidratación del cemento y por el otro es indispensable para asegurar la trabajabilidad y la buena compactación del hormigón.

En general cualquier agua natural que sea potable, y que no tenga olor o gusto fuerte, puede ser usada como agua de mezclado para el hormigón. Las impurezas excesivas contenidas en el agua de mezclado pueden:

- Afectar los tiempos de fraguado, las resistencias y la estabilidad volumétrica del hormigón
- Originar eflorescencias en la superficie del hormigón
- Causar corrosión de las barras de acero para armaduras.

El agua que proviene de la red de agua potable se considera apta ya que contiene pequeñas cantidades de cloruros que se consideran insignificantes y no aportan cloruros al hormigón. Aguas puras de cordillera o lluvia son agresivas, pues disuelven la cal de los hormigones; producen una pérdida de impermeabilidad y protección del acero. Aguas de mar sólo se pueden utilizar en hormigones simple no utilizables estructuralmente. No puede usarse agua con azúcares (sacarosa, glucosa, etc). Un kilogramo de azúcar en un camión mixer hace que ese hormigón no fragüe.

3.2.1. Hidratación del cemento

En el momento que se ponen en contacto el agua y el cemento comienzan las reacciones de hidratación, las que se siguen generando a través del tiempo, siempre y cuando exista suficiente humedad y una adecuada temperatura en el medio que lo circunda.

En esta reacción química entre las partículas de cemento y el agua, los aluminatos se hidratan más rápido que los silicatos. La reacción del aluminato tricálcico con el agua es inmediata y libera mucho calor, por ello la incorporación del yeso que se usa para retrasar la velocidad de esta reacción.

El silicato tricálcico se hidrata más rápido que el silicato dicálcico, contribuyendo al tiempo de fraguado final y la ganancia de resistencia inicial. El silicato de calcio hidratado toma forma de "cristales" extremadamente pequeños e interconectados por productos externos generados en la hidratación, los cuales por sus dimensiones son denominados gel.

Durante la hidratación del cemento, se produce desprendimiento de calor tratándose de una reacción de carácter exotérmico. Si el calor que se genera en la pasta cementicia no se disipa con la misma rapidez con que se produce, queda un remanente que al acumularse incrementa la temperatura de la masa. El calentamiento del hormigón lo expande, de manera que posteriormente al enfriarse sufre una contracción, normalmente restringida, que genera esfuerzos de tensión capaces de agrietarlo.

La hidratación requiere 0.22~0.25 kg de agua por kilo de cemento. Es imprescindible la existencia de suficiente cantidad de agua, razón por la cual se debe evitar su evaporación. Para que el cemento se hidrate completamente, la relación agua/cemento de la pasta de cemento debe ser entre 0.35 y 0.40. Pero se suele usar mas agua para que la mezcla sea manejable y si bien un elevado contenido de agua contribuye a una mejor hidratación del cemento, al evaporarse crea vacíos capilares denominados poros, los cuales no contienen materia sólida, aunque pueden estar llenos de agua.

Los siguientes tipos de vacíos pueden estar presentes en el hormigón:

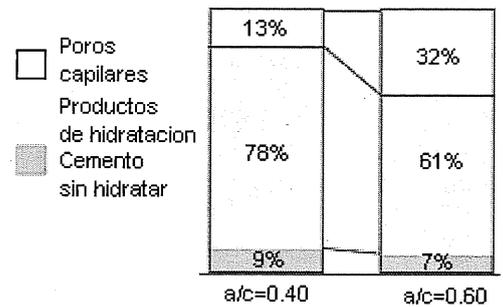
- *Poros por Aire Atrapado:* Durante el proceso de mezclado una pequeña cantidad de aire (1%) es aportado por los materiales y es la que queda atrapada en la masa de hormigón. Son parte inevitable de toda pasta.
- *Poros por aire incorporado:* Es un aditivo para mejorar la durabilidad del hormigón en lugares donde hay hielo/deshielo.
- *Poros capilares:* Son los espacios originalmente ocupados por el agua en el hormigón fresco, los cuales en el proceso de hidratación del cemento no han sido ocupados por el gel. Aumenta el número de poros capilares cuando la relación agua-cemento es alta. Pero dependerá del curado, dosificación y exposición del hormigón, que estos poros contengan aire por evaporación.

Estos vacíos aumentan la porosidad y la permeabilidad del hormigón y reducen su resistencia mecánica, durabilidad y estabilidad de volumen.

Como el proceso de endurecimiento del hormigón dura años, hasta que se completa la hidratación de todas las partículas de cemento, y como el gel solo puede desarrollarse en los espacios originalmente llenos de agua, es determinante las condiciones de humedad y temperatura en que es "mantenido" el hormigón a través del tiempo para mejorar la resistencia y en general su calidad. Si bien los poros se cierran progresivamente con el avance en la hidratación del cemento, llegando incluso a bloquearse, se ha establecido que con relaciones agua/cemento superiores a 0,58 el bloqueo de capilares en la pasta es imposible.

Es decir que queda un importante sistema conectado de poros que produce un brusco aumento de la permeabilidad, con la consiguiente baja de resistencia e ingreso de sustancias agresivas capaces de perjudicar las armaduras.

En la figura se observa el volumen de poros en pastas de cemento con relaciones agua cemento de 0.40 y 0.60, cuando se ha hidratado el 80% del cemento. Publicación Cementos Minetti.



3.3. Los agregados

3.3.1. Generalidades

Generalmente se entiende por “agregado” a la mezcla de arena y piedra de granulometría variable. El hormigón es un material compuesto básicamente por agregados y pasta cementicia, elementos de comportamientos bien diferenciados:

- Los agregados conforman el esqueleto granular del hormigón y son el elemento mayoritario ya que representan el 80 - 90% del peso total del hormigón, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo. Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.
- La pasta cementicia (mezcla de cemento y agua) es el material activo dentro de la masa de hormigón y como tal es en gran medida responsable de la resistencia, variaciones volumétricas y durabilidad del hormigón. Es la matriz que une los elementos del esqueleto granular entre sí.

3.3.2. Influencia de los áridos en las propiedades del hormigón

El esqueleto granular está formado por los agregados que son elementos inertes, generalmente más resistentes que la pasta cementicia y además mas económicos. Por lo tanto conviene colocar la mayor cantidad posible de agregados para lograr un hormigón resistente, que no presente grandes variaciones dimensionales y a la vez sea económico.

Pero hay un límite en el contenido de agregados gruesos dado por la trabajabilidad del hormigón. Si la cantidad de agregados gruesos es excesiva, la mezcla se volverá difícil de trabajar y habrá una tendencia de los agregados gruesos a separarse del mortero (segregación). Llegado este caso se suele decir que el hormigón es “áspero”, “pedregoso” y “poco dócil”.

En el hormigón fresco, es decir recién elaborado y hasta que comience su fraguado, la pasta cementicia tiene la función de lubricar las partículas de agregado, permitiendo la movilidad de la mezcla. En este aspecto también colabora el agregado fino (arena).

La arena debe estar presente en una cantidad mínima que permita una buena trabajabilidad y brinde cohesión a la mezcla. Pero no debe estar en exceso porque perjudicará las resistencias. Se debe optimizar la proporción de cada material de forma tal que se logren las propiedades deseadas al mínimo costo.

- Agregado grueso en exceso: ⇒ afecta la trabajabilidad
- Arenas en exceso: ⇒ perjudica las resistencias

3.3.5. Tipos de agregados – Características de los agregados

Naturales	Arena
	Grava
	Canto rodado
Triturados	Arena de trituración
	Piedra partida

A. Forma

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, particularmente en lo que hace a la docilidad y resistencias mecánicas respectivamente. Las partículas redondeadas, como son los cantos rodados, resultan en hormigones muy dóciles, en tanto que los agregados triturados dan lugar a hormigones menos trabajables aunque el efecto será tanto menor cuanto más se aproximen a poliedros de mayor número de caras (tabla pag.52).

Las formas elongada y la plana o lajosa dan lugar a hormigones de peor calidad. Disminuyen la trabajabilidad del hormigón, obligando a un mayor agregado de agua y arena, lo que en definitiva se traduce en una disminución de la resistencia. Además las formas lajosas tienden a orientarse en un plano horizontal, acumulando agua y aire debajo de ellas, lo que repercute desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones. Por otra parte, aunque el tipo de material sea muy resistente, estas formas debilitan las piedras y se pueden romper en el mezclado y la compactación del hormigón.

Los agregados triturados, cuando tienen buena forma, resultan en hormigones con alta resistencia a flexotracción, por lo que son los preferidos para pavimentos para carreteras.

B. Textura superficial

La textura superficial de los agregados afecta la calidad del hormigón en estado fresco y tiene gran influencia en las resistencias, repercutiendo más en la resistencia a flexotracción que a compresión.

La mayor rugosidad superficial de los agregados aumenta la superficie de contacto con la pasta de cemento; haciendo necesaria la utilización de mayor contenido de pasta para lograr la trabajabilidad deseada, pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración.

En el caso del canto rodado, su superficie es lisa, da mejor trabajabilidad al hormigón pero menor adherencia pasta-agregado. El caso del canto rodado triturado plantea una situación intermedia entre las anteriores.

C. Absorción y humedad

Se denomina absorción a la humedad del agregado cuando tiene todos sus poros saturados con agua pero la superficie del mismo está seca. Este estado se llama saturado superficie seca. Es en esta condición como se hacen los cálculos de dosificación para elaborar hormigón.

Pero el agregado puede tener diferentes estados de humedad, como se ilustra en la figura.

Si la piedra o arena tienen una humedad inferior a la absorción, se debe agregar más agua al hormigón para compensar la que absorberán los agregados.

Por el contrario, si la humedad está por encima de la absorción, el agua a agregar al hormigón será menor, ya que los agregados aportarán agua.



En el caso de las arenas dosificadas en volumen, se suma el inconveniente de que las arenas ocupan diferentes volúmenes de acuerdo a la humedad, por un fenómeno denominado esponjamiento. Este fenómeno hace que una arena de río con 5 - 7 % de humedad incremente su volumen en un 25 % respecto de la misma arena en estado seco.

Se debe ajustar la cantidad de agua a agregar al hormigón teniendo en cuenta la humedad de los agregados en el momento de elaborar el hormigón, ya que:

- Si la humedad es alta, aumentará la relación agua-cemento y caerán las resistencias
- Si es baja, no se logrará la trabajabilidad deseada

Todos estos agregados pueden ser utilizados para los hormigones convencionales, aunque las arenas de trituración deben ser necesariamente mezcladas con arenas de río. Cualquiera sea el tipo de material utilizado, sus partículas deben ser duras y resistentes, ya que el hormigón, como cualquier material, se romperá por su elemento más débil. Si el agregado es de mala calidad sus partículas se romperán antes que la pasta cementicia, o el mortero.

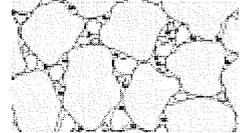
3.3.3. Granulometría

Se denomina así a la distribución por tamaños de las partículas que constituyen un agregado, y se expresa como el porcentaje en peso de cada tamaño con respecto al peso total.

La importancia de la granulometría de los agregados totales en el hormigón se debe a que, por razones de economía, mayor resistencia y mayor estabilidad volumétrica, conviene que los agregados ocupen la mayor masa del hormigón, compatible con la trabajabilidad.

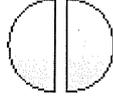
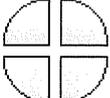
Esto se logra tratando que la mezcla de agregados sea lo más compacta posible, es decir, que la cantidad de huecos dejada por los agregados sea mínima; o sea, lograr la máxima "compacidad".

El tener una distribución por tamaños adecuada hace que los huecos dejados por las piedras más grandes sean ocupados por las del tamaño siguiente y así sucesivamente hasta llegar a la arena, donde sus diferentes tamaños de granos harán lo propio.



Para esto las granulometrías deben ser "continuas", es decir que no debe faltar ningún tamaño intermedio de partícula.

La pasta cementicia debe recubrir todas las partículas de agregado para "lubricarlas" cuando el hormigón está fresco y para unir las cuando ha endurecido. Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie lateral de los agregados mayor será la cantidad de pasta necesaria. Se ve que el tamaño máximo debe ser el mayor posible, esto es el máximo compatible con la estructura a hormigonar.

		
Partícula de agregado	Al dividirla en dos, aparecen nuevas superficies a cubrir con pasta	Al dividir nuevamente en mitades, aumentan las superficies a cubrir

Sin embargo, los tamaños máximos de los agregados quedan limitados, ya que deben permitir que la mezcla pueda llenar totalmente los encofrados y cubrir completamente las armaduras, sin segregación y para minimizar la formación de oquedades y nidos de abeja en la masa del hormigón.

El tamiz que separa un agregado grueso de un fino es el de 4,75 mm. Es decir, todo agregado menor a 4,75 mm es un agregado fino (arena).

A. Agregado fino

Las arenas suelen caracterizarse con su módulo de finura, que es un número que da una idea de la granulometría del material. A mayor módulo de finura, más gruesa es la arena. El módulo de finura debe ser igual o mayor que 2,3 e igual o menor que 3,1.

B. Agregado grueso

Las diferentes fracciones de agregados gruesos se identifican con dos números que hacen referencia al tamaño mínimo y máximo de las mismas (generalmente en mm). Ejemplo: 6-19, 19-30, 10-30, etc.

El tamaño máximo nominal del agregado grueso debe ser menor que:

- 1/3 del espesor en una losa, ó 1/5 de la menor dimensión lineal en cualquier otro elemento estructural.

- 3/4 de la mínima separación libre horizontal o vertical entre dos barras contiguas de armaduras, o entre grupos de barras paralelas en contacto directo que actúen como una unidad.
- Se recomienda también que el tamaño máximo del agregado grueso sea igual o menor que 3/4 del mínimo recubrimiento libre de las armaduras.

De acuerdo con lo anterior puede considerarse:

Tamaño máximo de agregado grueso	Apto para:
50mm y 37,5mm	Pavimentos, bases, vigas y plateas de fundación armadas, rellenos de pozos, zanjas, etc
25mm	Estructuras corrientes, losas, vigas, columnas, fundaciones, hormigón bombeado, etc
19mm	Los mismos usos que el anterior pero de difícil llenado, tales como vigas angostas, zonas muy armadas, tabiques, paredes de tanque de agua, cisternas, etc
12,5mm	Tabiques delgados

3.3.7. Resistencias mecánicas

La influencia de los agregados en la resistencia del hormigón no sólo es debida a la propia resistencia de éstos, sino también a su forma, textura, limpieza superficial y absorción.

Lo normal es que los hormigones tengan una resistencia a compresión comprendida entre 20 y 50 MPa. Los agregados comúnmente usados tienen resistencias muy superiores a estos valores.

Sin embargo, cuando se quiere producir hormigones de alta resistencia sí es necesario realizar una cuidadosa selección de los agregados, considerando su resistencia. En este caso particular el mortero cementicio alcanza resistencias muy altas y, por lo tanto, la piedra debe estar a un nivel similar o superior.

3.3.8. Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado se produce entre los álcalis, generalmente aportados por el cemento, y ciertos componentes reactivos que pueden tener algunos agregados, siempre que existan condiciones adecuadas de humedad.

Como resultado de esta reacción se produce un gel. Este gel absorbe agua, dando lugar a una hinchazón importante que puede originar fuertes presiones sobre la pasta de cemento, produciendo su rotura.

Es por esto que es necesario evaluar los agregados desde el punto de vista de su reactividad alcalina potencial antes de utilizarlos en un hormigón. Los métodos de ensayo para esta evaluación requieren de 6 meses a 1 año, aunque también se cuenta con ensayos acelerados orientadores de esta situación.

En ocasiones el ataque se manifiesta en las superficies del hormigón en forma de fisuras de "pata de gallo". Este fenómeno es importante en aquellas zonas del país en las cuales se dispone de agregados reactivos.

3.3.9. Requerimientos normativos

Los requerimientos físico-químicos de los agregados finos y gruesos que garanticen la aptitud para su uso en la elaboración de hormigones vienen dados en las normas IRAM 1512 y 1531 respectivamente. Antes de utilizar un material se debe verificar el cumplimiento de todos estos requerimientos a fin de alcanzar en el hormigón la calidad buscada.

Las sales, las arcillas u otras películas que pueden estar adheridas a las partículas de los agregados disminuyen su adherencia con la pasta de cemento y deben ser removidas por lavado durante el procesamiento del agregado.

Se recomienda analizar todos los agregados que se extraen de yacimientos marítimos o de yacimientos donde los agregados estén en contacto directo con agua de napa contaminada con cloruros, con el objeto de determinar su contenido de sales de cloro.

3.4. Los aditivos

3.4.1. Definición y clasificación

Los aditivos son sustancias que se agregan al hormigón. A través de sus acciones químicas y/o físicas, estas sustancias modifican determinadas características del hormigón fresco y del endurecido, como el fraguado, la trabajabilidad, el endurecimiento.

El uso de los aditivos se justifica por razones técnicas y económicas. Determinadas características del hormigón fresco y del endurecido no pueden realizarse sin el agregado de aditivos. Éstos pueden contribuir a disminuir el costo de la mano de obra y de los materiales. Además permiten el ahorro de energía y facilitan la colocación del hormigón.

Las especificaciones y requerimientos de los aditivos para hormigón se encuentran en la norma IRAM 1663.

3.4.2. Dosificación

Los aditivos son agregados generalmente en forma líquida en pequeñas cantidades en el momento del mezclado. Su porcentual en peso con respecto al cemento se sitúa habitualmente entre 0,2 y 2 %. De todos modos, la dosificación debe hacerse siguiendo las indicaciones del productor.

En la preparación de la fórmula del hormigón será necesario tener en cuenta la parte de líquido introducida para dosificaciones superiores a 1 %. De igual forma se tendrá presente la cantidad de aire introducida a la mezcla por medio de aireadores. La dosificación en defecto se manifiesta en la disminución rápida del efecto deseado, mientras que la dosificación en exceso puede tener efectos indeseables como demoras en el fraguado, la segregación o la pérdida de resistencia a la compresión.

3.4.3. Tipos principales de aditivos

A. Fluidificantes y superfluidificantes

Los fluidificantes (F) y los superfluidificantes (SF) son los aditivos más utilizados para la elaboración del hormigón. Los fluidificantes mejoran la trabajabilidad del hormigón en presencia de una relación A/C constante, y por otro lado, si se desea conservar el nivel de trabajabilidad, los fluidificantes permiten reducir la cantidad de agua necesaria y en consecuencia la relación A/C. En este caso aumentan la resistencia y la impermeabilidad.

Se puede además, si bien en forma controlada, conjugar los dos efectos, mejorando la trabajabilidad y reduciendo la relación A/C. Finalmente, y no por esto de menor importancia, se citan la ventaja económica, la mayor trabajabilidad y las mejores características finales del hormigón que derivan del agregado de fluidificantes.

Un posible efecto secundario que se puede dar seguidamente al uso de fluidificantes es una cierta demora en el fraguado. Aquí entran en juego las características del cemento y de los agregados usados. Por esto se recomienda verificar la compatibilidad entre los constituyentes y los aditivos, sobre todo en el caso de dosificaciones elevadas de aditivo o también cuando se trabaja con más de un aditivo simultáneamente.

B. Incorporadores de aire

El rol de los aireadores es introducir en el hormigón millones de pequeñas burbujas de aire con diámetro comprendido entre 50 y 300 μm . De esta manera se mejora sensiblemente la resistencia al hielo y a las sales anti-hielo. Como resultado además se obtiene el mejoramiento de la trabajabilidad y la disminución de la segregación.

La pérdida de resistencia es un efecto indeseable que se produce con el uso de los incorporados de aire. A cada 1 % de aire ocluido corresponde una pérdida de resistencia igual de 1 a 3 Mpa.

Las burbujas introducidas en el hormigón fresco persisten en el hormigón endurecido. En caso de hielo, éstas acumulan parcialmente el agua en movimiento en los capilares. El aire representa 3-6 % del volumen del hormigón.

La compatibilidad de nuevas combinaciones debe ser absolutamente probada mediante exámenes preliminares.

C. Retardadores

Estos aditivos retardan el inicio del fraguado de la pasta de cemento y prolongan el intervalo que se dispone hasta su uso. Se utilizan sobre todo para la confección de hormigones con características particulares. Las principales aplicaciones de los retardadores son las siguientes.

- Hormigonado a temperaturas elevadas.
- Transporte a larga distancia.
- Hormigonado de grandes volúmenes o superficies extensas.
- Supresión de las juntas de trabajo en caso de pausas de trabajo programadas (ninguna discontinuidad entre las etapas de trabajo).
- Atenuación de la liberación de calor derivado de la hidratación en el hormigón masivo.

Un hormigón con agregado de retardante endurece más lentamente en la fase inicial, pero desarrolla resistencias después de 28 días, a menudo levemente más elevadas que el hormigón convencional. A causa del endurecimiento inicial retardado, el hormigón con agregado de retardadores necesita de un cuidado particular.

En el caso de una dosificación en exceso, el efecto de los retardadores puede llegar a inhibir el fraguado o, por el contrario, invertir su efecto, transformándolos en acelerantes.

D. Acelerantes

Los acelerantes y los productos anti-hielo aceleran el inicio del fraguado y liberan más rápidamente el calor de hidratación. La mayor parte de estos aditivos acelera también el endurecimiento del hormigón. Estos permiten además desencofrar, someter a cargas o también exponer el hormigón al hielo dentro de un período de tiempo bastante más corto. Pero, además causan siempre una pérdida más o menos importante de la resistencia final del hormigón.

En el caso de una dosificación excesiva, se observa una demora más que una aceleración del fraguado y el endurecimiento (efecto contrario). Siendo difícil cuantificar su efecto, los acelerantes son utilizados sólo en casos particulares:

- Hormigón proyectado
- Hormigonado en contacto con aguas en escurrimiento.
- Hormigonado a bajas temperaturas.
- Impermeabilización rápida de infiltraciones de agua.
- Trabajos de reparación.
- Intervalo de desencofrado muy corto.

No obstante que el agregado de los aditivos permite a menudo obtener interesantes prestaciones, no se debe olvidar el hecho de que éstos introducen una mayor complejidad en el sistema agregado - agua - cemento. La mezcla de determinados aditivos puede también producir reacciones no deseadas. Por este motivo se aconseja no mezclar los aditivos que provienen de distintos productores.

3.5. Barras de acero para hormigón armado

3.5.1. Producción

La palabra “acero” indica una gama de materiales en la que se encuentran aleados el Hierro y el Carbono. Una aleación es una mezcla íntima de dos o más elementos químicos, en estado líquido, donde por lo menos uno de ellos es un metal.

En las aleaciones Hierro – Carbono, las distintas proporciones del segundo elemento determinan las propiedades mecánicas del acero. Generalmente el carbono representa entre el 0,5% y el 1,5% de la aleación. Cuando el tenor de Carbono supera el 1.7%, las propiedades de la aleación se modifican sustancialmente, y los productos obtenidos se denominan fundiciones.

Este proceso se produce en un proceso de dos fases.

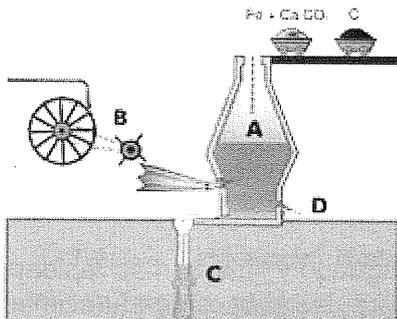
Primero el mineral de hierro es reducido o fundido con coque y piedra caliza en los altos hornos. El coque es un combustible obtenido de la destilación de la hulla calentada a temperaturas muy altas en hornos cerrados la cual le añaden calcita para potencializar su combustión.



La hulla es un tipo de carbón mineral, que como todos los carbones es una roca sedimentaria, y contiene entre un 45 y un 85% de carbono.

Es dura y quebradiza, estratificada, de color negro y brillo mate o grasoso. Este material surge como resultado de la descomposición de la materia vegetal de los bosques primitivos, proceso que ha requerido millones de años. Es el más común de los carbones.

El producto fundido es moldeado como arrabio (materia prima en la obtención del acero) y conducido a la siguiente fase como hierro fundido.



(A). carga de capas alternas de carbón y mineral de hierro

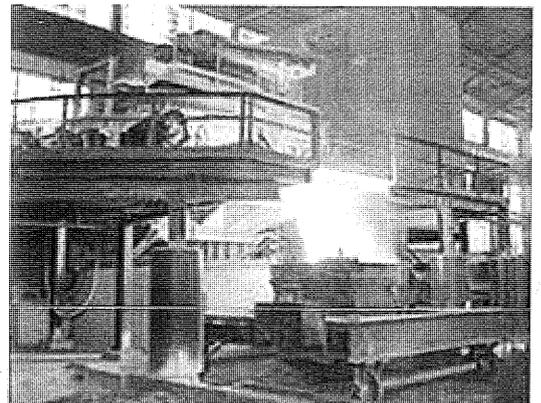
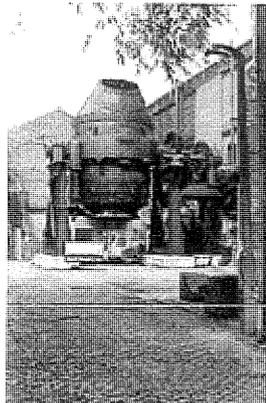
(B). el hierro, se deposita en el fondo unas toberas introducen aire

(C). un orificio en la base del horno permite fluir el arrabio

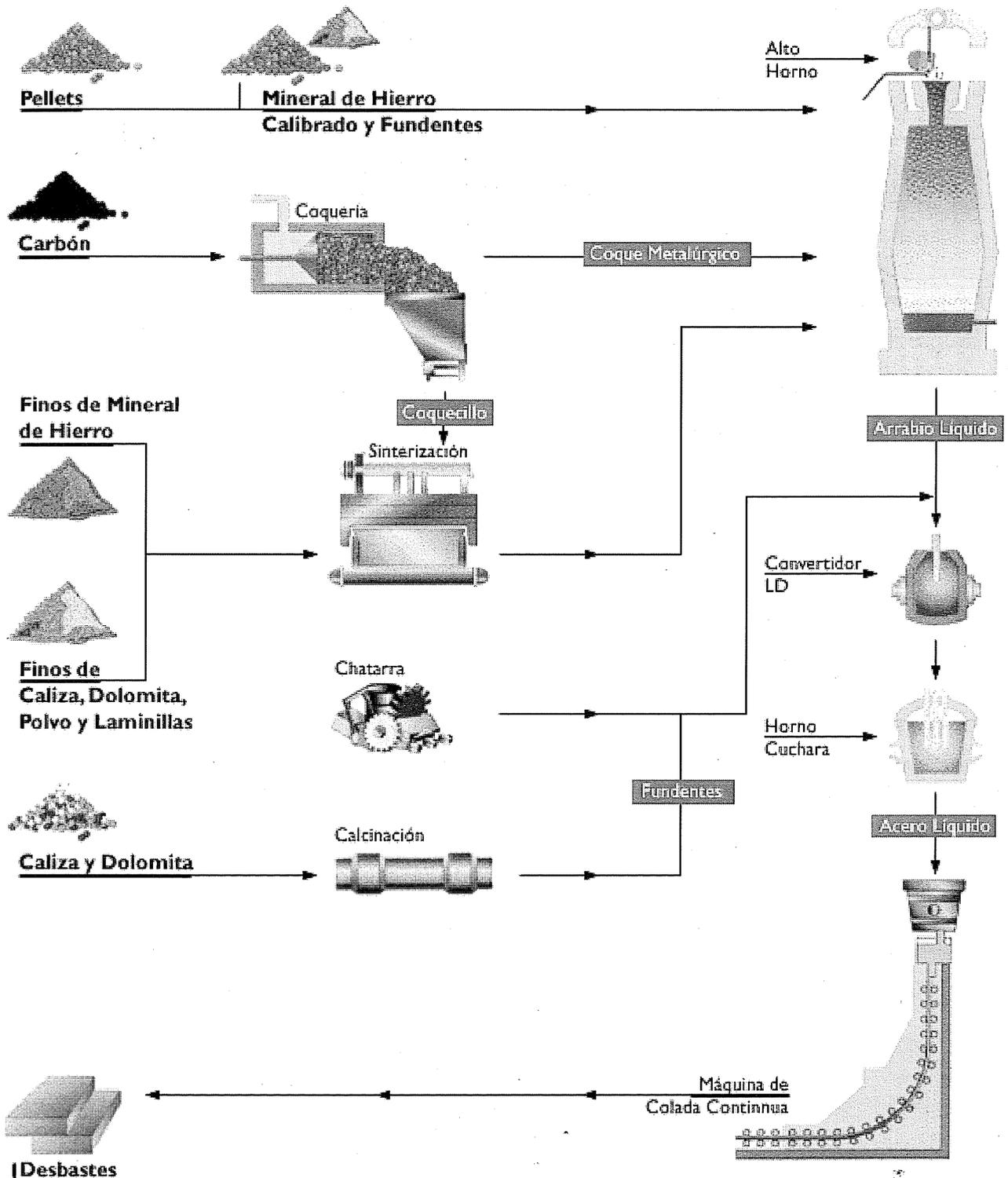
(D). encima de esta abertura otra boca permite retirar la escoria

Dentro del conjunto de aceros para hormigón armado, los tenores de Carbono no superan el 0.35%, y puede producirse a gran escala con procesos bien definidos que responden a criterios técnico económicos rigurosos. Para proporciones más elevadas de Carbono se generan desventajas como una mayor dureza, una sensible reducción de la ductilidad (o aumento de la fragilidad), e inconvenientes crecientes en su fabricación, que se suma a un mayor costo de producción.

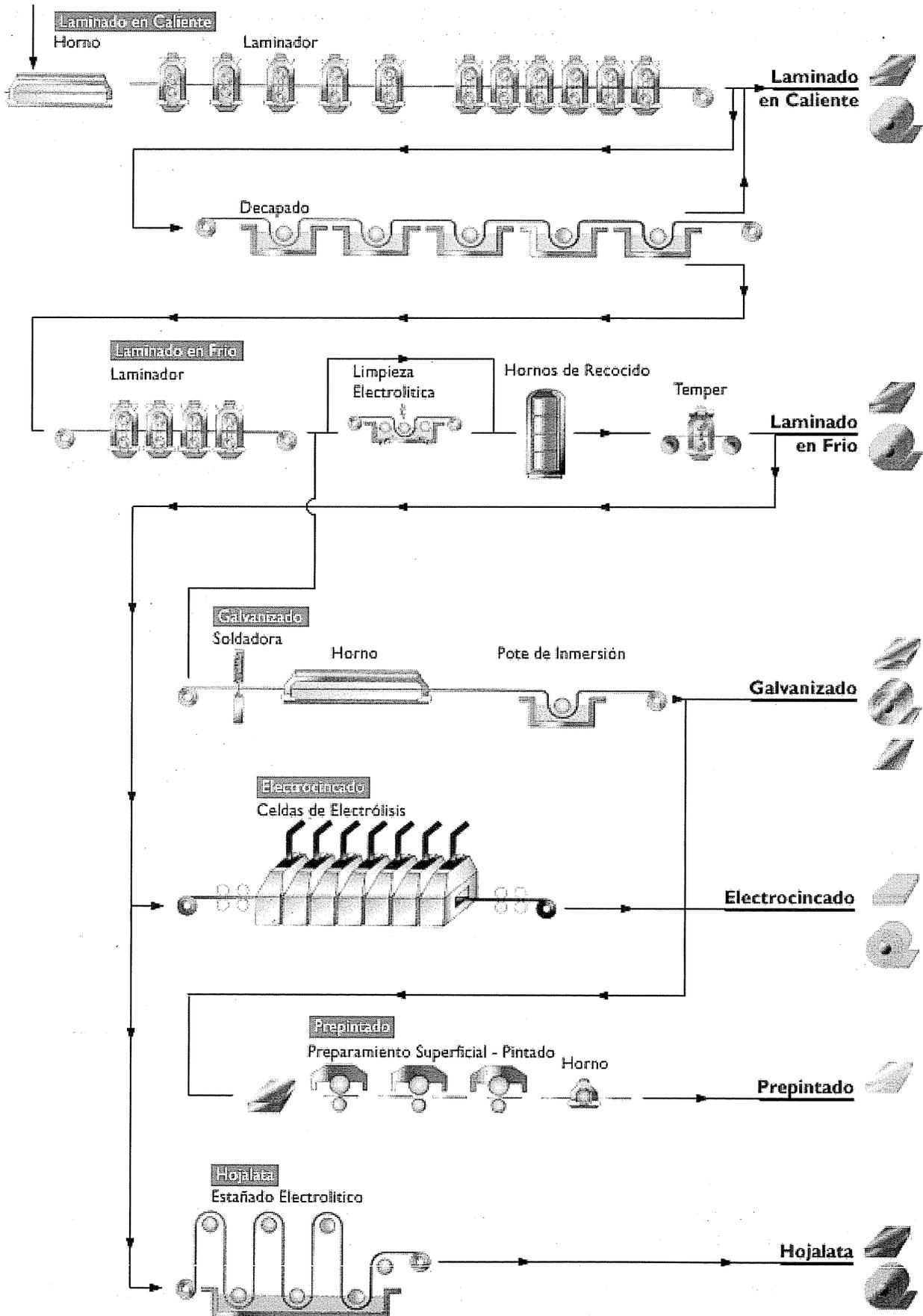
La segunda fase, la de acería, tiene por objetivo reducir el alto contenido de carbono introducido al fundir el mineral y eliminar las impurezas tales como azufre y fósforo, al mismo tiempo que algunos elementos como manganeso, níquel, cromo o vanadio son añadidos en forma de ferro-aleaciones para producir el tipo de acero demandado.



En las instalaciones de colada y laminación se convierte el acero bruto fundido en lingotes o en laminados; desbastes cuadrados (gangas) o planos (flog) y posteriormente en perfiles o chapas. Este es un proceso en el cual se reduce el espesor del material pasándolo entre un par de rodillos rotatorios. Los rodillos son generalmente cilíndricos y producen productos planos tales como láminas o cintas. También pueden estar ranurados o grabados sobre una superficie a fin de cambiar el perfil, así como estampar patrones en relieve. Este proceso de deformación puede llevarse a cabo, ya sea en caliente o en frío.



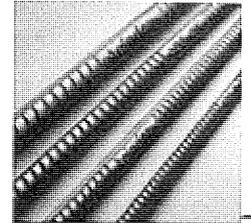
Fuente ACINDAR



Fuente ACINDAR

Todo lo que se ha avanzado en relación con las características tecnológicas de los aceros estructurales es el resultado de una extensa y detallada serie de trabajos y ensayos que constituyen a su vez el elemento retroalimentador de la evolución tecnológica.

El acero utilizado en hormigón armado es distribuido comercialmente en varillas con resaltes (corrugadas) con distintos diámetros comerciales.



Presentación		Diámetros
Barras de 12 m	a granel	6 al 40
Cortado y doblado	según planilla	6 al 40

Diámetros comerciales

Diám. nominal	Perim. nominal	Peso nominal	Peso por barra 12m
mm	cm	kg/m	kg
6	1,88	0,222	2,66
8	2,51	0,395	4,74
10	3,14	0,617	7,40
12	3,77	0,888	10,7
16	5,03	1,580	18,9
20	6,28	2,470	29,6
25	7,85	3,850	46,2
32	10,10	6,310	75,7
40	12,60	9,860	118,3

» Identificación de las barras

- Frente

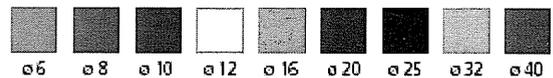


- Dorso



Tensión de fluencia (MPa) Diámetro nominal de la barra (mm)

» Identificación en la chapa según color



3.5.2. Reglamentación

Tanto en el Reglamento CIRSOC como en sus Comentarios, las indicaciones relativas a los diámetros de las barras, los alambres o los cordones, y sus secciones transversales, se realizan en función de las dimensiones nominales de la armadura, de acuerdo con lo establecido en las normas IRAM-IAS correspondientes.

Se deben utilizar exclusivamente barras de acero conformadas y alambres conformados. Las barras y alambres de acero lisos sólo se pueden utilizar para la ejecución de espirales, estribos y zunchos.

Las barras a soldar en obra deben ser fácilmente soldables, con elementos de aporte que no requieran utilizar procedimientos especiales y cumplir con los requisitos de carbono equivalente y composición química, establecidos en la norma.

Cuando se deban soldar barras colocadas en estructuras existentes y se desconozca el tipo de acero de las mismas, se debe determinar previamente el carbono equivalente y verificar si las barras tienen endurecimiento mecánico en frío.

Si se comprueba que las barras tienen un procedimiento de endurecimiento mecánico en frío se prohíbe cualquier procedimiento de soldadura.

o **Acopio**

Las barras, alambres, cordones y mallas de acero soldadas para armaduras se deben colocar sobre tirantes o durmientes con separadores de madera u otros materiales, con el fin de impedir que se mezclen los distintos tipos, diámetros y partidas de cada uno de ellos.

Los acopios se deben realizar separados del suelo o piso, como mínimo a una distancia de 15 cm; debiendo adoptarse todas las medidas tendientes a evitar el crecimiento de malezas en el sector.

Según el uso al que estén destinados, se debe acopiar respetando las siguientes condiciones:

1. Aceros para armaduras de estructuras de hormigón: bajo techo, o a la intemperie por un período no mayor de 60 días.
2. Acero para uso en hormigón pretensado: bajo techo, en locales cerrados y aireados, y estibados de tal forma que circule aire entre los rollos. Cuando en los locales de almacenamiento la humedad relativa ambiente sea igual o mayor del sesenta por ciento (60 %), los mismos deben ser calentados para evitar la formación de agua de condensación.

Cada partida de barras, alambres, cordones y mallas de acero soldadas se debe identificar colocando un cartel visible en el espacio en que esté ubicada, donde conste el número del remito de envío, el tipo de acero y el diámetro del material de la partida.

4. Propiedades del Hormigón Fresco

El hormigón se halla en estado fresco cuando su masa posee plasticidad y tiene la facultad de poder moldearse. Las propiedades que lo afectan en este estado pueden describirse:

- Trabajabilidad
- Consistencia
- Cohesión
- Homogeneidad
- Tixotropía
- Compacidad
- Fraguado

4.1. Trabajabilidad

La trabajabilidad y plasticidad es una propiedad del hormigón fresco que determina la facilidad y homogeneidad con que se puede mezclar, transportar, colocar en los encofrados, compactar y acabar la mezcla, con la mínima segregación de los componentes.

Debe tener la necesaria consistencia y la correspondiente cohesión, para lo cual afectarán: la cantidad de agua, la forma y medida de los áridos, la cantidad de cemento, la existencia de aditivos, y la presencia de cenizas. En cuanto al agua y al cemento, sus cantidades están vinculadas por la siguiente relación:

4.1.1. Relación agua-cemento:

Relación entre la cantidad de agua, excluyendo solamente aquella absorbida por los agregados, y la cantidad de cemento; preferentemente expresada en forma decimal y abreviada a/c.

- Elección de la relación agua/cemento

La elección de la relación A/C depende principalmente de la agresividad del ambiente al que estará expuesto el hormigón y de los requisitos mecánicos que el hormigón endurecido debe satisfacer.

El reglamento CIRSOC 201 establece límites máximos de esta relación para una cantidad determinada de casos. La práctica muestra que es más bien difícil obtener una relación A/C menor a 0,45 y al mismo tiempo una trabajabilidad normal.

Tabla 7: Razones agua/cemento máximas especificadas por razones de durabilidad o por otros motivos

Condición de exposición	a/c máx (en peso)	Observaciones
Frecuente o continuamente humedecido y expuesto a los efectos de la congelación y deshielo		
<ul style="list-style-type: none"> secciones de espesor menor de 500 mm o con recubrimientos libres de las armaduras menores de 25 mm, y todo hormigón expuesto a la acción de sales descongelantes 	0,45	(1)
<ul style="list-style-type: none"> Todo otro tipo de estructuras 	0,50	(2)
Estructuras expuestas al aire, a la intemperie, clima lluvioso o semiárido. Sólo por excepción temperaturas < 0 ° C	0,53	
Cisternas y depósitos para agua, conductos, tuberías y toda estructura que deba resultar impermeable y estar destinada a contener agua o soluciones no agresivas :		
<ul style="list-style-type: none"> espesores de 100 a 400 mm espesores mayores 	0,48 0,53	
Fundaciones de hormigón armado o pretensado y otras estructuras enterradas en contacto con :		
<ul style="list-style-type: none"> aguas o suelos húmedos, no agresivos agua de mar 	0,50 0,45	(3)
Estructuras en ambientes cerrados con frecuentes contactos con aire muy húmedo y fuertes condensaciones a temperatura ambiente (cocinas industriales, baños públicos, lavaderos, ambientes húmedos de natatorios y establos)	0,53	
En contacto con sulfatos solubles en agua :		
<ul style="list-style-type: none"> Ataque débil o moderado. Concentraciones de sulfato (como SO₄=), en muestras de suelos, comprendidas entre 0,10 y 0,20 % en masa (1000 y 2000 mg/kg), o entre 200 y 1500 ppm (mg/l) en muestras de agua 	0,53	(3)
<ul style="list-style-type: none"> Ataque fuerte, idem, en muestras de suelos comprendidas entre 0,2 % y 2,0 % en masa (2000 a 20000 mg/kg), o entre 1500 y 10000 ppm (mg/l) en muestras de agua 	0,45	(4)
<ul style="list-style-type: none"> Ataque muy fuerte. Idem, en muestras de suelos mayores de 2,0 % (20000 mg/kg) o de 10000 ppm (mg/l) en muestras de agua 	0,45	(5)
<ul style="list-style-type: none"> En contacto con otras sustancias o líquidos químicamente agresivos (agresión ácida, etc.) 	0,40	(6)
<ul style="list-style-type: none"> Hormigón colocado bajo agua mediante el método de tolva y tubería vertical 	0,45	

(1) y (2) Hormigón con aire intencionalmente incorporado

(3) Cemento Portland MRS

(4) Cemento Portland ARS

(5) Conviene CP Puzolánico + ARS

(6) Se recomienda que la estructura esté protegida por una membrana impermeable, capaz de resistir la agresión. En general, el hormigón no tiene capacidad de resistir la agresión ácida.

Una relación agua-cemento baja aumenta la resistencia al medio ambiente, provee una buena adhesión entre capas de hormigón, provee una buena adherencia entre hormigón y acero y limita los cambios de volumen debido al secado y humedecido.

4.2. Consistencia

Movilidad relativa o capacidad de fluir de un hormigón fresco. El indicador habitual es el asentamiento y puede ser estimada prácticamente mediante diversos métodos de examen de consistencia

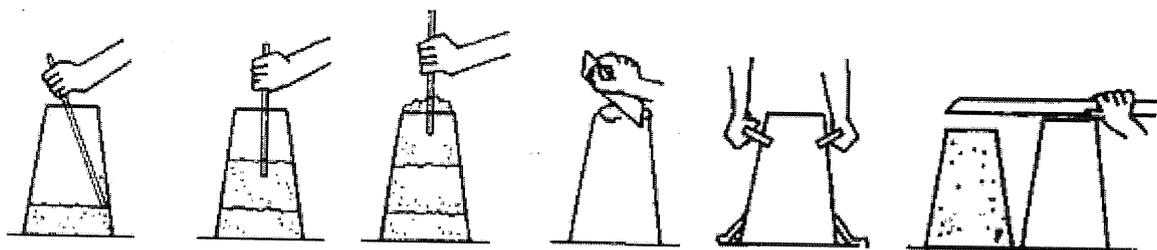
El Reglamento CIRSOC establece: el hormigón tendrá una consistencia acorde con las características de los elementos estructurales a hormigonar y con los medios disponibles para permitir su transporte, colocación y correcta compactación, sin que se produzca segregación ni exudación perjudicial.

4.2.1. Métodos de examen para la consistencia

En Argentina se utilizan tres métodos de examen para la valoración de la consistencia del hormigón: el método de asentamiento en el cono de Abrams, que es el más difundido; el método de extendido en la mesa de Graff, menos utilizado; y el ensayo de Vebe que solo se utiliza en laboratorio para consistencias muy secas.

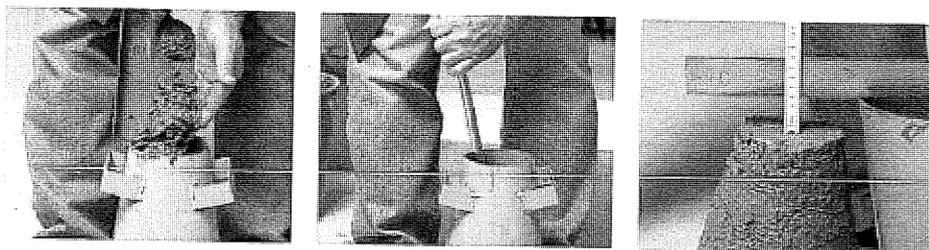
A. Cono de Abrams

- Se coloca el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos sólo con agua. No se permite emplear aceite ni grasa.
- El operador se para sobre las pisaderas evitando el movimiento del molde durante el llenado y llena el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen y se apisona cada capa con 25 golpes de la varilla-pisón distribuidas uniformemente.
- La capa inferior se llena hasta aproximadamente 7 cm de altura y la capa media hasta aproximadamente 16 cm de altura. Al apisonar la capa inferior se darán los primeros golpes con la varilla-pisón ligeramente inclinada alrededor del perímetro. Al apisonar la capa media y superior se darán los golpes de modo que la varilla-pisón penetre la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa se deberá mantener permanentemente un exceso de hormigón sobre el borde superior del molde.



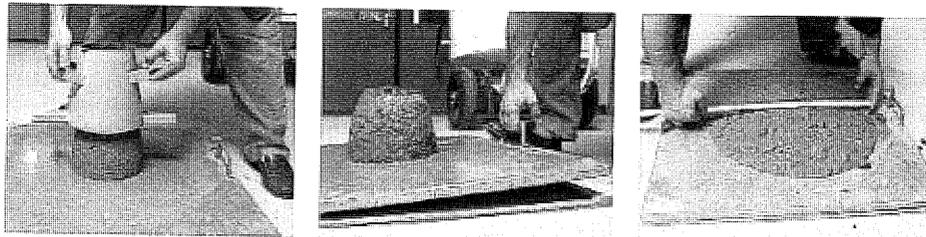
Ensayo de asentamientos del cono de Abrams.

- Se enrasa la superficie de la capa superior y se carga el molde con las manos, sujetándolo por las asas y dejando las pisaderas libres y se levanta en dirección vertical sin perturbar el hormigón.
- Una vez levantado el molde se mide inmediatamente la disminución de altura del hormigón moldeado respecto al molde, aproximando a 0,5 cm.



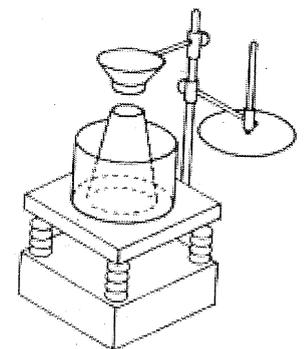
B. Mesa de Graff

- Este equipo es el apropiado para ensayar mezclas de hormigón con alta y muy alta trabajabilidad. Se compone de una mesa doble cuadrada de 70 cm de lado con la parte superior revestida en chapa galvanizada, con un lateral unido a la base por medio de bisagras.
- El ensayo consiste en introducir hormigón en un cono centrado sobre la superficie que luego de sacudirlo quince veces desde una altura determinada, se deja fluir sobre la mesa, evaluando su trabajabilidad.



C. Ensayo de Vebe

- Este ensayo consiste en medir el tiempo necesario para remodelar mediante vibración una masa de hormigón en forma troncocónica y transformarla en una forma cilíndrica, empleando para este objeto un aparato normalizado en Suecia, según se indica en la figura.
- Su uso resulta mas adecuado para hormigones de muy baja fluidez y constituye en dicho rango un buen complemento de la medición del asentamiento del cono.



4.2.2. Rangos de consistencia

El Reglamento define seis intervalos de consistencia de hormigones cuyas denominaciones y métodos de evaluación se indican:

Consistencia	Intervalo			Ensayo de evaluación aplicable
	Remoldeo (V) (s)	Asentamiento (A) [cm]	Extendido (E) [cm]	
Muy seca	$5,0 < V \leq 30,0$	--	--	Tiempo de remoldeo en el dispositivo VeBe. Norma IRAM 1767.
Seca	--	$2,0 < A \leq 5,0$	--	Asentamiento del Cono de Abrams. Norma IRAM 1536.
Plástica	--	$5,0 < A \leq 10,0$	--	Asentamiento del Cono de Abrams. Norma IRAM 1536.
Muy plástica	--	$10,0 < A \leq 15,0$	$50 < E \leq 55$	Asentamiento del Cono de Abrams. Norma IRAM 1536. Extendido en la Mesa de Graf. Norma IRAM 1690.
Fluida	--	$15,0 < A \leq 18,0$	$55 < E \leq 60$	Asentamiento del Cono de Abrams. Norma IRAM 1536. Extendido en la Mesa de Graf. Norma IRAM 1690.
Muy fluida	--	--	$60 < E \leq 65$	Extendido en la Mesa de Graf. Norma IRAM 1690.

Para los rangos de consistencia mencionados, son de aplicación las indicaciones siguientes:

- En hormigones de consistencia fluida, cuando las mezclas sean poco cohesivas se adoptará el ensayo de extendido en la Mesa de Graf para medir la consistencia, en reemplazo del asentamiento del cono de Abrams. Al efecto, se considerará que las mezclas son poco cohesivas, cuando al desmoldar el cono de Abrams no se perciba el círculo superior del tronco de cono de hormigón y/o se observe, en el borde exterior de la mezcla desmoldada, una aureola de agua libre significativa.
- En las mezclas fluida y muy fluida, la consistencia se logra utilizando la combinación de la menor cantidad de agua y la mínima dosis de aditivo superfluidificante que permita el llenado de los encofrados, sin provocar segregación. Estos hormigones pierden esa fluidez de modo significativo con el transcurso del tiempo. Por esa razón se deberá verificar que el hormigón disponga de la consistencia requerida al momento de ser colocado en los moldes, especialmente para los casos de importantes transportes y/o esperas de colocación.

4.2.3. Valores de asentamiento recomendados para distintos tipos de obra

	Mínimo	Máximo
Muros y bases armadas, para cimientos	5	10
Pilotes y tabiques de submuración	10	15
Columnas, losas, vigas y tabiques de llenado no dificultoso	10	15
Ídem anterior de poco espesor o fuertemente armados	10	+ de 15
Pavimentos	5	5
Hormigón bombeado	7,5	+ de 15

Una vez obtenida la consistencia necesaria para el hormigón fresco, con relación a la obra a moldear y los medios disponibles para su manejo, es fundamental adoptar las medidas precisas para mantenerla invariable, dentro de las tolerancias establecidas, hasta completar la puesta en obra del mismo. A tal efecto es menester considerar en su comportamiento la exudación.

4.2.4. Exudación del hormigón

La exudación se produce porque parte del agua de mezclado tiende a subir hacia la superficie debido fundamentalmente a la incapacidad de los componentes sólidos de la mezcla a retener toda el agua.

Consecuencias de la exudación:

- En elementos estructurales que superan los dos metros de altura (columnas), una exudación elevada se traduce en disminución importante en la resistencia del hormigón colocado en la parte superior del mencionado elemento estructural.
- Si el agua exudada por una capa es tomada por una nueva, superpuesta, queda una zona porosa y de menor resistencia.
- Tiende a producir arrastre de partículas finas y blandas, las cuales debilitan la parte superior del hormigón.
- Se puede estimar que una capacidad de exudación del 7 al 8 % puede disminuir la resistencia en la estructura en un 20% respecto de la resistencia potencial de la misma mezcla de hormigón.

4.2.5. Influencia de otras características del hormigón sobre su consistencia

Gracias a los fluidificantes, en particular a los superfluidificantes, es posible confeccionar hormigones con relaciones A/C= 0,5 ó menores y con consistencias plástica - blanda - fluida. El mejoramiento de la consistencia no debería nunca ser realizado mediante el posterior agregado de agua.

Además de los aditivos, muchos otros factores tienen influencia sobre la consistencia. La modificación de factores aislados o también la de un conjunto de ellos, no actúan solamente sobre la consistencia sino también sobre la resistencia (y otras características) del hormigón, a menudo en sentido opuesto.

La tabla muestra los efectos sobre la consistencia y la resistencia al variar determinados parámetros de base del hormigón.

Variación	Efecto sobre La consistencia	Efecto sobre la resistencia a la compresión
Mejoramiento de la continuidad en la granulometría	↑↑	--
Aumento del tenor en agregados redondos	↑↑	--
Aumento del tenor en agregados triturados	↓↓	↑↑
Aumento del agua de la mezcla	↑↑	↓↓
Aumento de la temperatura del hormigón fresco	↓↓	↓↓
Empleo de superfluidificantes	↑↑	↑↑
Empleo de incorporadores de aire	↑↑	↓↓
Empleo de retardadores	↑↑	↑↑
↑↑ Efecto favorable ↓↓ Efecto desfavorable -- Ningún efecto particular		

Efecto de la variación de diversos parámetros sobre la consistencia y la resistencia del hormigón. Fuente Cementos Minetti

4.3. Cohesión

A medida que se incorpora agua en una mezcla, la humectación creciente de las partículas da lugar a un efecto lubricante favorable que, simultáneamente, provee cohesión y movilidad. En determinado momento, el incremento del contenido de agua favorece el predominio de las fuerzas separadoras, entonces líquidos y sólidos tienden a separarse entre sí. Las mezclas pierden cohesión y las partículas más pesadas, que son los componentes más afectados por este fenómeno, tienden a decantar, mientras que los líquidos y las partículas más livianas son expulsados hacia arriba.

Existe un punto en el cual el aumento del contenido de agua comienza a ser desfavorable. Por eso para consistencias de hormigones fluida y muy fluida se requiere del empleo de un aditivo químico superfluidificantes que permiten mantener la cohesión en la mezcla.

4.4. Homogeneidad

Se dice del material que tiene las mismas propiedades en todos los puntos. En el Hormigón fresco se consigue mediante un buen amasado. La homogeneidad es necesaria para que la mezcla llegue a las distintas partes de los encofrados de los elementos estructurales.

En el hormigón endurecido se consigue cuando el mismo no presenta "juntas frías". Se produce este fenómeno cuando se colocan capas superpuestas del material con una separación de tiempo tal que impide que ambas capas puedan "soldarse". La capa inferior debe conservar un estado plástico suficiente como para permitir la perfecta adherencia entre ambas y proporcionar homogeneidad al hormigón.

4.4.1. Mezclado

El mezclado del hormigón tiene como objetivo producir una mezcla razonablemente homogénea, por lo cual el tiempo mínimo de mezclado será el necesario para alcanzar la uniformidad. El tiempo de mezclado se mide a partir del momento en que todos los materiales componentes ingresaron al tambor de la mezcladora.

El tiempo de mezclado necesario para alcanzar la uniformidad de un determinado hormigón depende del tipo y capacidad de la hormigonera, del rango de consistencia del hormigón y del tipo y tamaño

máximo del agregado grueso. A cada tipo de hormigonera corresponde un límite de carga mínimo por debajo del cual la homogeneidad no puede ser garantizada.

El tiempo máximo no debe exceder de tres veces el mínimo determinado para cada equipo y no debe superar para ningún equipo los cinco minutos, ya que su prolongación no genera beneficios adicionales de homogeneidad y puede provocar desgaste del agregado grueso, incremento de la pérdida de agua por evaporación, elevación de la temperatura de la masa fresca y pérdida del contenido de aire intencionalmente incorporado; fenómenos todos ellos que determinan un incremento de la consistencia, lo que se traduce en una mayor demanda de agua para la mezcla.

El mezclado del hormigón se puede completar en planta central, o durante el transporte siendo en estos casos la velocidad de mezclado de la motohormigonera diferente.

4.4.2. Transporte

El hormigón elaborado debe ser transportado lo más velozmente posible desde la hormigonera a la obra. Los medios de transporte del hormigón deben ser capaces de entregar, en el punto de descarga, en forma continua y confiable, un hormigón de constitución homogénea.

La descarga total de las motohormigoneras se debe producir antes de que transcurran noventa minutos contados a partir del momento en que el agua se puso en contacto con el cemento.

En situaciones de tiempo caluroso, o en condiciones que favorezcan el endurecimiento del hormigón, ese tiempo de transporte se debe limitar a 60 minutos.

Si un vehículo no puede ser descargado en el momento de su arribo a la obra, debe esperar en un lugar protegido (a la sombra o bajo techo). Si la espera se prolonga, el hormigón sólo podrá ser utilizado para trabajos secundarios o provisorios (rellenados, caminos de obras, etc.).



4.4.3. Segregación

La falta de homogeneidad puede producir la segregación de los componentes, siendo las posibles causas:

- Dosificación inadecuada
- Exceso de agua o falta de agua
- Insuficiente tiempo de mezclado
- Transporte prolongado
- Vibraciones durante el transporte
- Colocación en los encofrados con alturas de caída excesivas.

La segregación es la concentración diferencial de los componentes del hormigón mezclado, lo que provoca una dosificación no uniforme en la masa. Se produce por

- La tendencia de los agregados gruesos de separarse del hormigón y acumularse a un lado cuando el hormigón pasa por los extremos no confinados de las mangas.
- La tendencia de los sólidos de separarse del agua por sedimentación gravitatoria.

4.5. Tixotropía

Propiedad del hormigón fresco que le permite rigidizarse en un período breve mientras está en reposo, pero adquirir una menor viscosidad al ser agitado mecánicamente. Esta propiedad es la que permite el traslado y la colocación de la mezcla fresca en los moldes antes que comience el proceso

de fraguado y endurecimiento. Será imprescindible mantener el proceso de agitación durante este período.

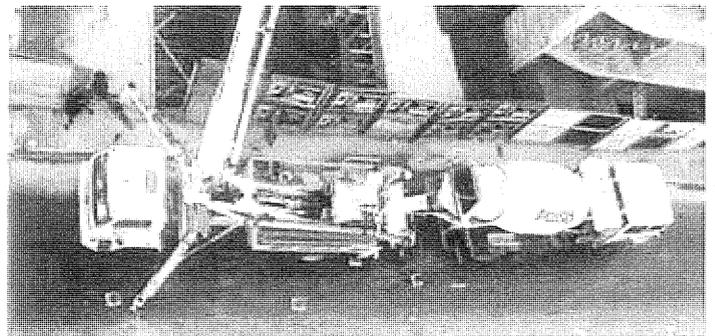
No obstante esta propiedad, el hormigón debe ser conducido desde el lugar de descarga de la motohormigonera hasta el emplazamiento definitivo, con la mayor rapidez posible y sin interrupciones, empleando métodos y procedimientos que eviten la pérdida de humedad y la segregación del mismo.

4.5.1. Equipos a utilizar para la descarga en obra

A. Canaletas: sólo se deben emplear como elementos auxiliares, cuando sea necesario alcanzar zonas reducidas y aisladas de la estructura, y con mezclas de hormigón que no manifiesten tendencia a la segregación. Se recomienda su uso para consistencias blandas y fluidas.

B. Cintas: su uso está limitado a hormigones con consistencias muy seca, seca, plástica y muy plástica.

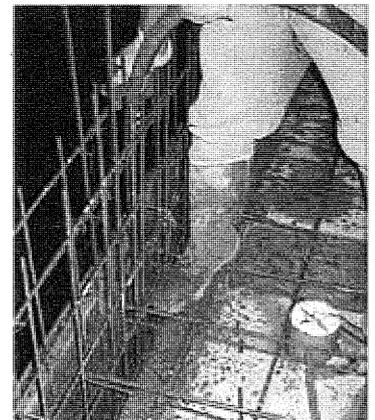
C. Por bombeo: será posible si la composición del hormigón lo permite, evitando la segregación y transportándose como una vena continua. Las cañerías de bombeo deben poder soportar el doble de la presión máxima del equipo. No deben estar constituidas por aluminio y deben tener un diámetro interno por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que contenga el hormigón a bombear. Los conductos flexibles, o mangas, sólo se deben admitir en el extremo de descarga.



D. Tuberías verticales: se colocan desde una cota superior a una cota inferior. Deben estar constituidas por caños de sección circular. Los mismos pueden ser metálicos, de material plástico o de goma. Su diámetro debe ser igual o mayor que ocho veces el tamaño máximo del agregado grueso. Su uso abarca desde consistencias rígidas a blandas.

4.5.2. Colocación:

Una vez alcanzado el tiempo de fraguado inicial del hormigón y hasta por lo menos 24 horas después de haberlo alcanzado, se debe evitar todo movimiento, golpe o vibración de los encofrados y de los extremos salientes de las armaduras.



Pautas a observar al verter el hormigón fresco

A. El ingreso del hormigón en los encofrados se debe realizar en forma continua y con la menor velocidad de colocación posible, evitando la innecesaria manipulación de la mezcla fresca que genere segregación de sus componentes. El vertido se debe efectuar de modo tal que no reciba cambios bruscos en la dirección de su movimiento.

B. Los elementos de fundación no se deben ejecutar directamente sobre el suelo. Este debe ser cuidadosamente limpiado, compactado y alisado, para luego recubrirlo con una capa de hormigón bien compactada y de un espesor igual o mayor que 50 mm, denominada capa de limpieza, de la misma calidad que el hormigón del elemento de fundación que apoyará sobre ella. El espesor de esta capa no se debe tener en cuenta a los efectos del dimensionamiento estructural.

C. El hormigón se debe colocar en capas horizontales y continuas de un espesor máximo de 0,50 metros las cuales deben ser perfectamente compactadas antes que la capa precedente haya alcanzado el tiempo de fraguado inicial. En columnas, vigas y otros elementos estructurales de volumen reducido con relación a la altura, el espesor de la capa de hormigonado se puede aumentar a 1,00 metro.

D. La máxima altura para verter el hormigón libremente será de 1,50 metros. Para alturas mayores se debe emplear embudos. No se debe colocar hormigón si las condiciones climáticas (lluvia, viento, nieve, humedad ambiente) pueden perjudicar su calidad.

4.6. Compacidad

La compacidad del hormigón hace referencia a la capacidad de acomodamiento que tienen las partículas de los ingredientes sólidos que lo componen. Para que un hormigón sea compacto, denso, sólido, homogéneo y por lo tanto resistente y durable se requiere lo siguiente:

- El uso de bajas relaciones agua/cemento.
- El uso de agregados densos, poco porosos y bien graduados.
- Una correcta colocación y compactación (sin segregación) del hormigón dentro de los encofrados.

Una compactación adecuada es esencial para la durabilidad del hormigón. Las ventajas de un hormigón compacto son las siguientes:

- elevada impermeabilidad;
- mejor durabilidad;
- elevada resistencia a la compresión;
- mejor adherencia del hormigón a la armadura.

4.6.1. Compactación:

Inmediatamente después de su colocación, el hormigón debe ser compactado hasta alcanzar la máxima densidad posible, evitando eliminar el aire intencionalmente incorporado en caso que exista, sin producir su segregación, y sin que queden porciones de hormigón sin consolidar.

El método de compactación se debe adoptar en función de la consistencia del hormigón fresco a colocar.

4.6.2. Métodos de compactación

La vibración del hormigón se efectúa con el objeto de reducir la fricción entre partículas para darle mayor movilidad a la masa fresca y para eliminar el aire que pudiese quedar ocluido en el hormigón, alcanzando así una mayor compacidad en el mismo.

A pesar de esto, en el interior de la matriz de hormigón queda aire que se define como "aire ocluido" y que ocupa aproximadamente un 1,5 % del volumen del hormigón, dependiendo del tamaño máximo del agregado utilizado.

En el caso de los hormigones de consistencia fluida o muy fluida, con aditivo superfluidificante, la vibración no es necesaria para mejorar la movilidad del hormigón fresco. Se recomienda utilizarla exclusivamente para eliminar el aire atrapado y mejorar la compacidad de la mezcla colocada, reduciendo el tiempo de vibración al mínimo imprescindible para tal objeto. Se debe evitar un exceso de vibrado que producirá la segregación del hormigón.

La elección del método de compactación depende de la consistencia del hormigón.

A. Vibradores de inmersión o internos:

El vibrador a aguja es introducido en el hormigón en forma rápida y a distancias regulares; después de haberlo dejado un breve tiempo en la profundidad máxima, debe ser levantado suavemente y finalmente extraído de forma tal que la superficie del hormigón vuelva por sí sola a tomar forma. Si la apertura dejada por el vibrador a aguja no toma su forma por sí sola, significa que la consistencia del hormigón es demasiado rígida, que el fraguado ya se inició, o que el tiempo de vibración no es suficiente.

En ningún caso se deben utilizar los vibradores de inmersión como medio para el desplazamiento del hormigón colado.

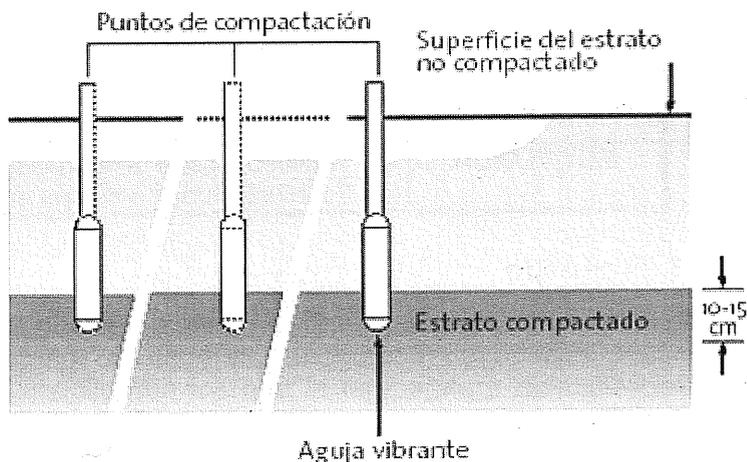
La distancia entre los puntos de inmersión de la aguja debe ser elegida de manera tal que los campos de acción se superpongan ligeramente. Es necesario suspender la vibración cuando en la superficie se forma un sutil estrato de mezcla fina y las grandes burbujas de aire comienzan a aflorar de modo esporádico.



Al vibrar una capa de hormigón, la inmediata inferior aún debe estar en condiciones de ser revibrada, no habiendo superado su tiempo inicial de fraguado. El vibrador debe atravesar la nueva capa totalmente y penetrar entre 10 y 15 cm la inferior para asegurar la unión entre ambas, evitando la formación de un plano de junta.

Regla práctica:

Distancia entre los puntos de inmersión = 10 veces el diámetro de la aguja.



Uso en capas y distancia entre los puntos de compactación. Fuente Cementos Minetti

B. Compactación manual por varillado

Se debe realizar mediante el picado de la masa fresca utilizando varillas de acero. Esta acción se debe complementar mediante el golpeo, con una maza, de los encofrados laterales.

Esta modalidad de compactación se puede usar exclusivamente en hormigones de consistencias muy plástica, fluida y muy fluida. En el caso de hormigones de consistencia muy plástica, el uso de este tipo de compactación está condicionado a que el mismo se realice en forma muy enérgica.

C. Vibradores de encofrados

Los hormigones de consistencias seca y plástica se pueden compactar con vibradores de inmersión y de encofrados. En aquellos casos en que el hormigón se encuentre en posición inaccesible para ser compactado con vibradores de inmersión se admite utilizar únicamente vibradores de encofrado.

Los vibradores de encofrado se deben usar siempre que se garantice que los encofrados sean lo suficientemente rígidos y resistentes como para evitar su desplazamiento y/o destrucción como consecuencia de la vibración aplicada.

Es conveniente la utilización de vibradores externos de encofrado cuando la disposición de la armadura dentro del encofrado no permita introducir satisfactoriamente a vibradores internos dentro de su radio de influencia, y cuando se requieran paramentos vistos muy lisos.

Tabla C 5.1. Medios de compactación recomendados para cada rango de consistencia del hormigón fresco

Consistencia	Sistema de compactación aplicable
MUY SECA	<ul style="list-style-type: none"> • Vibración interna y/o externa de máxima intensidad. • Vibro compresión. • Medios de compactación para suelos.
SECA	<ul style="list-style-type: none"> • Vibración interna y/o externa de máxima intensidad. • Vibro compresión.
PLASTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Apisonado enérgico superficial. • Vibración interna y/o externa de alta intensidad. • Centrifugación y vibro-compresión.
MUY PLASTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Varillado enérgico de la masa. • Apisonado intenso superficial. • Vibración interna de moderada intensidad. • Reglas vibratorias de acción superficial.
FLUIDA	<ul style="list-style-type: none"> • Acción de la gravedad. • Varillado normal de la masa. • Apisonado superficial suave. • Eventual vibración interna en casos limitados.
MUY FLUIDA	<ul style="list-style-type: none"> • Acción casi exclusiva de la gravedad. • Varillado normal de la masa. • Eventual vibración interna en casos limitados.

4.7. Fraguado

Es el período durante el cual la mezcla pasa de estado líquido al sólido. Todavía no tiene resistencia mecánica, mantiene su homogeneidad y ya no permite su transporte sin que se alteren sus condiciones finales.

El fragüe debe comenzar lo mas tarde posible a fin de permitir la colocación de la mezcla fresca en los moldes, y durar lo menos posible hasta completarse, para aprovechar los encofrados y habilitar las estructuras.

Inmediatamente después de su colocación, el hormigón necesita ser protegido desde la etapa fresca hasta la endurecida, de las acciones que pudieran agredirlo. Las protecciones que se le brinden deben permanecer hasta tanto el hormigón adquiera la resistencia suficiente para no ser afectado por las agresiones.

4.7.1. Tipo de agresión:

- a Secado prematuro por la acción del sol y del viento, particularmente en el caso de estructuras con grandes superficies no encofradas y expuestas.

- b** Secado prematuro por acción de la circulación del aire, particularmente en túneles, conductos, galerías y estructuras similares.
- c** Contacto directo con lluvia y/o nieve.
- d** Agua en movimiento.
- e** Aguas, líquidos, suelos o sustancias agresivas para el hormigón que puedan existir en el lugar de emplazamiento de la estructura.
- f** Acciones mecánicas, oscilaciones, vibraciones o sobrecargas.
- g** Acción de temperaturas extremas (tanto bajas como elevadas).
- h** Acción del fuego.

4.7.2. Curado:

Este proceso mantiene al hormigón endurecido, en sus primeros días, con un grado satisfactorio de humedad y temperatura para que pueda desarrollar sus propiedades deseables. El curado se efectúa en todas las estructuras, con independencia de la clase de hormigón de que se trate y del destino de las mismas.

A. Períodos mínimos de curado:

El curado inicia tan pronto el hormigón haya endurecido lo suficiente como para que su superficie no resulte afectada por el método de curado adoptado.

El período mínimo de curado para cada estructura de hormigón (no masivo), se cuenta a partir del momento de la colocación del hormigón.

Tipo de cemento empleado en el hormigón	Periodo minimo de curado
Cemento de alta resistencia inicial, cuando la edad de diseño del hormigón sea igual o menor que 7 días	3 días
Cemento pórtland normal Cemento pórtland con filler calcáreo Cemento pórtland con escoria Cemento blanco	5 días
Cemento pórtland puzolánico Cemento pórtland compuesto (*) Cemento de alto horno Cemento de bajo calor de hidratación	8 días
(*) Cuando el cemento compuesto tenga una velocidad de desarrollo de resistencia igual o mayor que la del cemento pórtland normal, el plazo mínimo de curado se reducirá a cinco (5) días.	

Se computan como días válidos de curado aquellos en los que la temperatura media del aire en contacto con la estructura sea igual o mayor que 10°C. Se computa un día de curado por cada dos días en que la temperatura media del aire esté comprendida entre 5°C y 10°C, además de adoptar los requisitos necesarios para el caso de un hormigón sometido a bajas temperaturas.

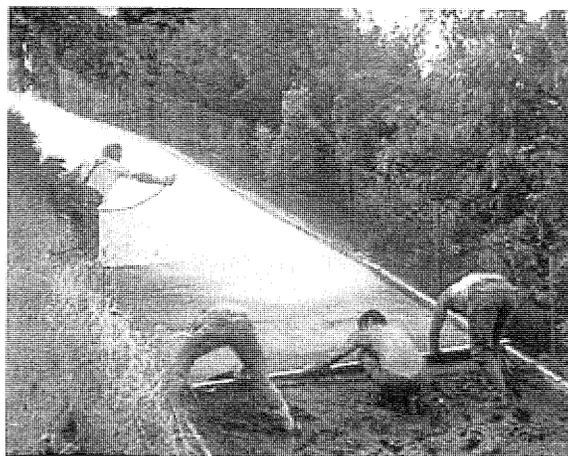
Cuando el hormigón de la estructura pueda estar en contacto con un medio agresivo, el período mínimo de curado indicado se incrementa como mínimo en 3 días, para todos los tipos de cemento.

Los métodos de curado que se pueden implementar se basan en evitar la pérdida del agua disponible en la mezcla fresca, restituir el agua perdida por evaporación durante el tiempo mínimo de curado, o acelerar su endurecimiento por curado con vapor.

B. Curado con agua

Consiste en mantener al hormigón permanentemente humedecido, a una temperatura mayor que 10 °C durante el período de curado. Se le adiciona el agua mediante su inmersión total, riego con agua en forma de niebla fina o mediante rociadores.

El agua se aplica directamente sobre la superficie del hormigón o sobre las cubiertas de arpilleras, mantos de arena, tierra o paja, que estén en contacto directo con la superficie de la estructura y en permanente estado saturado para mantener la humedad del hormigón el tiempo mínimo establecido.



C. Curado mediante membranas preformadas

Se puede efectuar el curado mediante la utilización de membranas preformadas que impidan la pérdida de agua del hormigón, las que se aplicarán tan pronto como sea posible, pero sin afectar la superficie del hormigón, especialmente en el caso de superficies donde además de la planicidad se deba respetar una determinada textura superficial.

Las membranas pueden ser Películas plásticas de un espesor mínimo de 0,100 mm y de color blanco o negro según convenga por razones térmicas.

D. Curado a vapor

Consiste en un proceso de endurecimiento acelerado de los elementos estructurales de hormigón. En el curado con vapor es necesario estudiar la metodología, procedimientos, equipos, elementos e instalaciones a emplear.

Para mantener la temperatura y la humedad dentro de las **cámaras de curado** se utiliza vapor saturado, de presión igual a la atmosférica. Los chorros de vapor deben rodear a los elementos estructurales y nunca incidir directamente sobre ellos, ni sobre las probetas moldeadas que se almacenen en la cámara para el control de las resistencias.

E. Curado mediante compuestos líquidos capaces de formar membranas

Los compuestos son productos líquidos y opacos y su color puede ser blanco o negro según convenga. En el caso de superficies expuestas de hormigón fresco, el producto se aplica después de finalizadas las operaciones de terminación de la superficie, e inmediatamente después que haya desaparecido la película brillante de agua libre existente sobre la superficie.

En el caso de superficies desmoldadas de hormigón endurecido, el producto se aplica después de finalizadas las operaciones de desencofrado, previa saturación de la superficie con agua.

El compuesto se aplica en dos capas cruzadas y colocadas una inmediatamente después de la otra, en la proporción que, por metro cuadrado de superficie, indique el fabricante. Si lloviese antes de que el producto haya secado, se procederá a cubrir nuevamente la superficie con el compuesto.

Las superficies cubiertas con el compuesto serán protegidas durante el período de curado del paso de peatones, equipos o vehículos sobre la membrana. Este método de curado no se aconseja aplicarlo sobre superficies a las cuales posteriormente se deba adherir hormigón fresco, mortero u otros revestimientos,

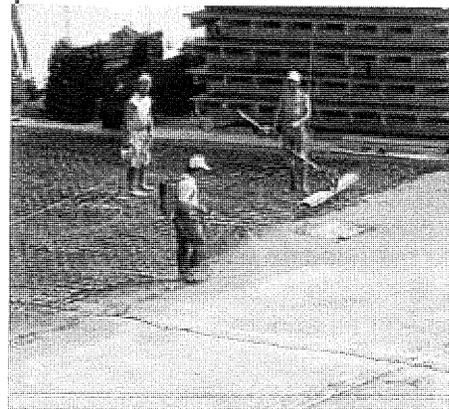
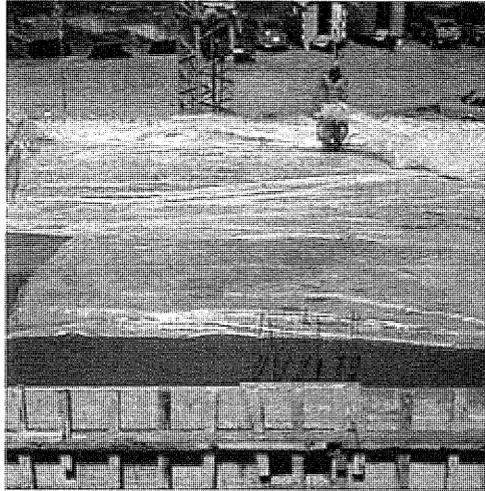


Fig. c. Regado de un compuesto formador de membrana sobre una calle de hormigón. Fuente Cementos Minetti

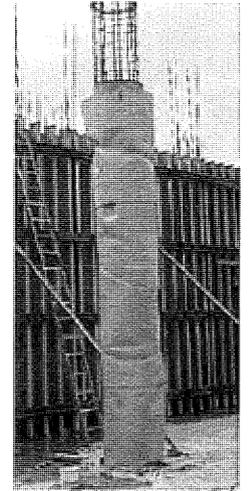
4.8. Hormigonado en tiempo frío

Se designa como "tiempo frío" en lo que se refiere al hormigón, a todo aquel en que la temperatura ambiente es inferior a 4,5 °C. El mayor riesgo ocurre por la congelación del hormigón fresco que puede ocasionar eflorescencias y otros daños superficiales.

Las temperaturas por debajo de 0 °C pueden llevar a la destrucción total o parcial del hormigón debido a las fuertes tensiones de tracción que se originan al congelarse el agua contenida en la masa del material. Las estructuras que más pueden ser dañadas son las muy expuestas y de pequeños espesores: losas, tanques de agua, columnas aisladas y de poca sección.



Cobertura de un techo de hormigón con una lámina de plástico. Fuente Cementos Minetti



Protección aislante de una pilastra. Fuente Cementos Minetti

4.8.1. Recomendaciones:

- A. Evitar todo exceso de agua de amasado en la mezcla.
- B. Las mejores horas para hormigonar en tiempo frío son por la mañana o al mediodía.
- C. Proteger al hormigón fresco de las heladas, tapándolo con maderas, bolsas, tierra, placas de telgopor, etc.
- D. Cubrir con láminas de polietileno las superficies horizontales expuestas a la intemperie, para evitar pérdidas de calor y humedad.
- E. Poner balizas ardientes (latas de aceite quemado, gasoil, etc.), en el área luego de por lo menos 24 hs después de hormigonado. En general los combustibles producen dióxido de carbono y solo deben usarse si existe una ventilación que asegure la eliminación del gas y (a razón de 1 cada 3 metros), extremando las precauciones por incendios.
- F. Una importante ayuda es el curado con vapor de agua. Debe envolverse la estructura en una especie de carpa o bolsa que permita la distribución de calor.
- G. Verificar que los encofrados no contengan escarcha o estén congelados.
- H. Usar encofrados de madera gruesa o isotérmica dobles. No usar encofrados metálicos.
- I. No apresurarse a retirar costeros de vigas y otros encofrados que proporcionan algo de aislación térmica.
- J. Por debajo de los -10 °C no es recomendable hormigonar, salvo que se trate de hormigón en masa y con medios de protección.

4.9. Hormigonado en tiempo caluroso

Se designa como "tiempo caluroso", a toda combinación de elevada temperatura, baja humedad relativa y velocidad del viento tendientes a desmejorar la calidad del hormigón.

Por cada 11 °C de aumento de temperatura, se duplica la velocidad de la reacción química entre el cemento y el agua.

Si el hormigón se seca prematuramente, la cantidad de agua disponible para esta reacción será insuficiente y se habrá perdido resistencia. Entre los efectos que esto produce se encuentra la contracción por secado y el agrietamiento, con la consiguiente disminución de la durabilidad.



4.9.1. Recomendaciones:

- A. Utilizar agua fría de mezclado, y si las condiciones de obra lo permiten, puede agregarse hielo en cantidad de reemplazo.
- B. Las mejores horas para hormigonar en tiempo caluroso son las últimas de la tarde, pues el fresco de la noche se producirá coincidente con la reacción de fragüe (exotérmica).
- C. Al colocar el hormigón en los encofrados, deben enfriarse estos y las armaduras rociándolos con agua.
- D. Debe colocarse el hormigón en capas de poco espesor.
- E. Tratar de hacer sombra sobre el hormigón recién vertido (tapando con polietileno o colocando una capa de antisol o similar, etc.)
- F. Cuando se utilizan películas plásticas en el curado, deben ser del tipo blanco opaco. Las transparentes provocan un efecto de "invernadero".
- G. No apresurarse a retirar costeros de vigas y otros encofrados que contribuyen a retener la humedad del hormigón durante su endurecimiento.
- H. Mojar abundantemente el hormigón y encofrados durante varios días, recordando que la calidad final del hormigón depende en gran medida del cuidado que se le prodigue durante sus primeros días de vida.

5. Propiedades del Hormigón Endurecido

En el hormigón endurecido, su resistencia y su durabilidad, dependen directamente de una buena preparación, de un desencofrado perfecto y de una compactación adecuada, operaciones éstas que deben llevarse a cabo de modo correcto en las etapas antes analizadas.

El proceso de endurecimiento comienza cuando la mezcla adquiere estado sólido, (es decir que ha concluido el fraguado) y continua durante años hasta que se completa la hidratación de todas las partículas de cemento.

Al hablar de resistencia se evalúa en forma global la calidad del hormigón, ya que el resto de las propiedades deseables mejoran al aumentar la resistencia del mismo. Las características que debe reunir en este estado el hormigón son:

- Resistencia mecánica
- Durabilidad
- Impermeabilidad
- Estabilidad dimensional
- Resistencia al fuego

5.1. Resistencia Mecánica

El valor que caracteriza a un hormigón es su resistencia a compresión, ya que siendo un material frágil tiene muy poca resistencia a tracción. En general, se asume que la resistencia de un hormigón, a determinada edad y curado a temperatura fija, depende principalmente de dos factores: la relación agua/cemento y el grado de compactación. Puede afirmarse que la relación agua/cemento es el factor que más influencia tiene en la resistencia de un hormigón totalmente compactado, esto es, con un volumen de aire del 1%, aproximadamente.

La relación existente entre la resistencia y la relación agua/cemento es, generalmente, atribuida a Duff Abrams, quién en 1919 estableció la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Donde:

a/c representa la relación agua/cemento de la mezcla (en un principio tomada en volumen)

K_1 y K_2 son constantes empíricas que dependen de la edad, del tiempo de curado, del régimen de curado, del tipo de cemento, del aire y, algo menos, del tipo y tamaño del árido.

Con una mayor relación agua/cemento bajan las resistencias, pues al haber más agua de la precisa para la hidratación del cemento dejará un gran volumen de huecos al evaporarse la sobrante.

La conocida como ley de Abrams, aunque determinada independientemente, es muy parecida a la norma que algunos años antes había formulado René Féret en Francia, concretamente en el 1896.

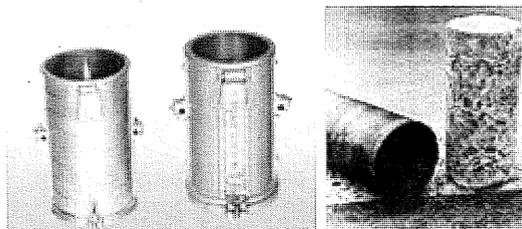
Este autor se dio cuenta de la importancia de la relación agua/cemento al establecer que la resistencia a compresión S , el volumen absoluto de cemento c , de agua e y aire a , estaban relacionados a través de una constante K por medio de la siguiente expresión:

$$S = K \left(\frac{c}{c + e + a} \right)^2$$

Recordamos aquí que la relación agua/cemento y el grado de hidratación de la mezcla determinan la porosidad de la pasta de cemento endurecida. Así, para cualquier etapa del proceso de hidratación el volumen de huecos obtenido en el hormigón depende, además de la relación agua/cemento, del grado de compactación alcanzado en la mezcla, hecho que explica por qué el volumen de aire existente en el hormigón está incluido en la ecuación de Féret.

Además, la resistencia mecánica que debe poseer un hormigón deberá estar en correspondencia con las necesidades de la estructura y será controlada tomando muestras de hormigón fresco en probetas cilíndricas normalizadas y ensayándolas a rotura por compresión en laboratorio, a 28 días.

Cada muestra se toma directamente de la canaleta de descarga del motohormigonero, después de haber descargado $1/4 \text{ m}^3$ de la carga y antes de descargar el último $1/4 \text{ m}^3$. Deben hacerse por lo menos 2 probetas de cada pastón. Con la finalidad de eliminar los huecos que puedan quedar en la masa, se compacta el hormigón en los moldes con una varilla normalizada.



Procedimiento: se llenan las probetas en tres capas de $1/3$ de la altura del molde, cada una. A cada capa se la compacta con 25 golpes de varilla. En la primera capa los golpes deben atravesar íntegramente la capa, pero sin golpear el fondo del molde. En la segunda y tercera penetrando 2 cm en la anterior. El llenado de la tercera se hace con un exceso de hormigón.

Luego se golpean los costados del molde suavemente con una maza de madera, a fin de eliminar micro burbujas de aire. Finalmente se enrasa el borde superior de la probeta y se almacenan en obra por 24 hs.

Transcurrido el tiempo se desmoldan y se transportan a laboratorio para su curado donde se almacenan en una pileta o cámara húmeda en condiciones normalizadas hasta el momento del ensayo.

Cabe recordar que este será el único ensayo que compruebe la resistencia a rotura a compresión del hormigón utilizado.

5.2. Durabilidad

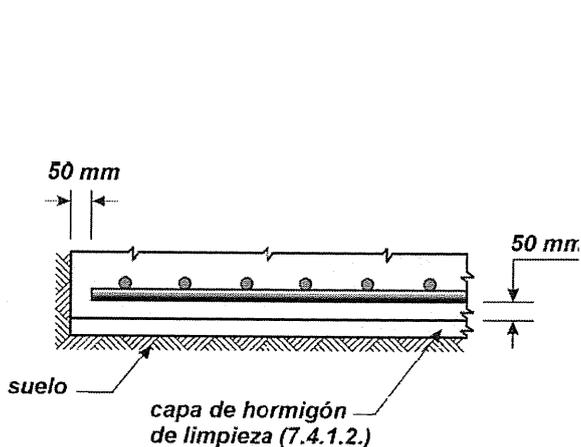
Es la capacidad del hormigón endurecido de soportar las agresiones del medio ambiente y otros factores, como el desgaste, sin deteriorarse. Debe asegurar su integridad y la de las armaduras a lo largo de toda la vida en servicio.

El **recubrimiento de hormigón** para protección de la armadura frente a la acción del clima y otras acciones, se debe medir desde la superficie del hormigón hasta la superficie exterior de la armadura a la que se aplica el recubrimiento.

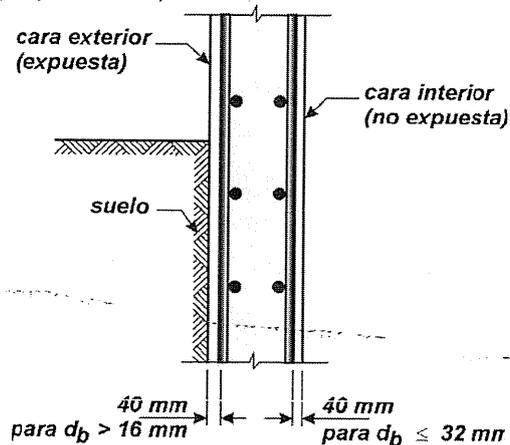
La armadura debe tener el recubrimiento mínimo de hormigón que se indica a continuación,

	Condición	Recubrimiento mínimo en mm
(a)	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Hormigón colocado en la base de las fundaciones, en contacto con la capa de hormigón de limpieza (El recubrimiento indicado NO incluye el espesor de la capa de limpieza) 	50
(b)	Hormigón en contacto con el suelo o expuesto al aire libre <ul style="list-style-type: none"> ☐ para barras con $d_b > 16 \text{ mm}$ ☐ para barras y alambres con $d_b \leq 16 \text{ mm}$ 	35 30
(c)	Hormigón no expuesto al aire libre ni en contacto con el suelo:	
	Losas, tabiques, nervaduras: <ul style="list-style-type: none"> ☐ para barras con $d_b > 32 \text{ mm}$ ☐ para barras y alambres con $d_b \leq 32 \text{ mm}$ 	30 20 pero $\geq d_b$
	Vigas, columnas: <ul style="list-style-type: none"> ☐ para armadura principal ☐ para estribos y estribos cerrados ☐ para zunchos 	d_b pero ≥ 20 y ≤ 40 20 40
	Cáscaras y placas plegadas: <ul style="list-style-type: none"> ☐ para barras con $d_b > 16 \text{ mm}$ ☐ para barras y alambres con $d_b \leq 16 \text{ mm}$ 	20 15

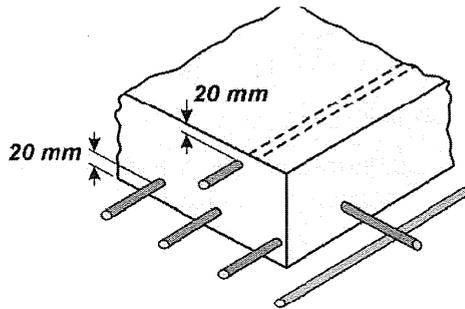
Hormigón colocado en obra (no pretensado)



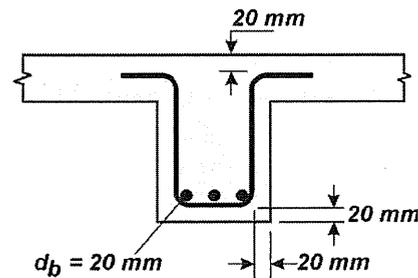
(a) Fundaciones



(b) Tabiques



(c) Losas con $d_b \leq 32 \text{ mm}$



(c) Vigas

5.3. Impermeabilidad

Es una característica estrechamente ligada a la durabilidad y presente en hormigones compactos y uniformes, donde no hayan quedado en la masa bolsones de aire o nidos de abeja por donde pudieran ingresar elementos agresivos.

5.4. Estabilidad dimensional

La norma llama a esta característica "constancia de largo", y se refiere a la capacidad del hormigón endurecido de mantener los cambios dimensionales dentro de ciertos límites para que sus efectos no resulten perjudiciales. Las retracciones o expansiones anormales más comunes son:

- Contracción por fraguado
- Contracción por secado o retracción
- Variaciones de origen térmico
- Variaciones producidas por cargas instantáneas
- Variaciones producidas por cargas permanentes

5.5. Resistencia al fuego

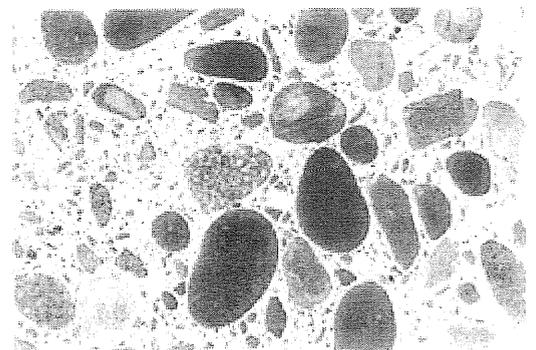
El peligro por el fuego en estructuras de H^ºA^º es pequeño, ya que sus elementos se calientan con lentitud y solo adquieren temperaturas elevadas bajo acción prolongada ya que resiste la acción del fuego aproximadamente 1 a 3 horas, sin protección extra.

La resistencia a compresión disminuye considerablemente (60% aprox.) con temperaturas superiores a los 400 – 500 °C. La tensión de fluencia del acero desciende a partir de 200 °C.

Los recubrimientos mínimos de las armaduras se deben aumentar para protección contra el fuego en los siguientes valores: Por cada 30 minutos de aumento de la resistencia al fuego:

- En tabiques, vigas y columnas 10 mm
- En losas 5 mm

A simple vista podemos observar que el hormigón está formado por un esqueleto granular –con partículas de distintas formas y tamaños– disperso en una matriz de pasta de cemento.



6. Dosificación del Hormigón

Desarrollo analítico del diseño de la mezcla. Método ICPA

El método que se propone es útil para el diseño de mezclas consideradas convencionales y no puede emplearse para el diseño de hormigones livianos. Su empleo permite asegurar la durabilidad bajo las condiciones de exposición del hormigón más comunes, aunque es menester dejar en claro que siempre deben respetarse las reglas del arte en lo que se refiere al mezclado, transporte, colocación, compactación y curado.

Análogamente a otros métodos racionales, se deben conocer las "propiedades" o características de los materiales componentes, así como las condiciones particulares de la obra y el equipamiento disponible.

Es evidente que las relaciones causa/efecto entre las propiedades de los componentes y las características del hormigón son demasiado complejas como para poder considerarlas a todas en un mismo modelo; por ello, éste selecciona las más relevantes y establece pautas adicionales que contemplan posibles cambios en las características de los materiales, empleo de aditivos reductores de agua, incorporación intencional de aire, tipo de agregado grueso, etc.

A continuación, se enumeran las etapas del método y luego se procederá al análisis pormenorizado de cada una de ellas.

ETAPAS

1. Elección del cemento a emplear (categorización por resistencia: CP30 – CP40 – CP50)
2. Elección de una consistencia adecuada.
3. Decidir si se incorporará aire en forma intencional.
4. Distribución granulométrica de agregados -
 - a) Seleccionar una curva o ámbito granulométrico apropiado para el agregado total
 - b) Selección y ajuste de las fracciones disponibles para ajustarse a lo seleccionado en 4.a (Mezcla de las distintas fracciones)
 - c) Cálculo del Módulo de Finura (MF) del Agregado Total, contemplando los retenidos sobre los tamices de la serie normal
5. Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y el MF del agregado total.
6. Cálculo de la resistencia de diseño, f'_{cr} , en función de la resistencia especificada (f'_{ce}) y el desvío estándar (S). Verificación del cumplimiento de la f'_{cm} mínima por razones de durabilidad.
7. Estimación de la relación a/c.
 - a) Determinación de la relación agua/cemento necesaria en función de la resistencia media a la edad de 28 días para las distintas categorías de cemento.
 - b) Verificación del cumplimiento de eventual relación agua/cemento máxima por razones de durabilidad.
8. Cálculo del contenido unitario de cemento y verificación del cumplimiento de eventual contenido de cemento mínimo por razones de durabilidad.
9. Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso 4.b

Se construye una tabla que sirve para afectar a estas cantidades por la absorción de los agregados y, en general, las proporciones de la mezcla se expresan para éstos en condición de saturados a superficie seca.

Ejercicio: Se deben obtener las proporciones adecuadas para elaborar un hormigón H-30. La separación de armaduras es de 30 mm y el espesor de recubrimiento es de 50 mm.

Las condiciones de colocación y los equipos disponibles en la obra permiten suponer que será necesario un asentamiento entre 10 cm y 15 cm y el control de calidad con que se producirá el hormigón será bueno.

Se cuenta con una piedra partida granítica 6-20 y arenas de río gruesa y fina, todas con densidad relativa 2,65 y absorción de 0,5%, 0,6% y 0,8% respectivamente, con las granulometrías indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Granulometría de los agregados a emplear.

Abertura Tamiz IRAM (mm)	Agregados Finos		Agregado Grueso
	Silíceo gruesa	Silíceo fina	Piedra 6 - 20
37,5	100	100	100
25,0	100	100	100
19,0	100	100	100
12,5	100	100	69
9,5	100	100	44
4,75	97,3	99	13
2,36	71,7	97	1
1,18	43,5	84	
0,600	24,1	45	
0,300	5,2	18,1	
0,150	2	0,7	

1. Elección del cemento a emplear (CP30 - CP40 - CP50)

La elección del cemento a emplear está condicionada por la disponibilidad en plaza de los distintos cementos y el nivel de resistencia que se pretende. También puede influir la existencia de requisitos en los pliegos de contenidos mínimos de cemento, los precios relativos entre las distintas categorías de cemento o la necesidad de obtener resistencias a corto plazo. Sin embargo, podríamos decir que para hormigones de Clase H13 o inferior, puede optarse por cementos CP 30 ó CP 40, para hormigones de clase superior a H 13 debería optarse por CP 40 ó CP 50, al igual que para hormigones de alta resistencia.

La clase de hormigón impone el empleo de un cemento CP40 ó CP50. Es decir, se opta por un cemento CP40 densidad = 3,10 kg/dm³.

2. Elección de la consistencia (asentamiento) adecuada.

Tal como se indicó, debe estimarse qué consistencia es la que proporcionará una correcta trabajabilidad al hormigón. No debe asociarse a un hormigón fluido con uno trabajable; debe evaluarse la disponibilidad del equipamiento para colocar y compactar el hormigón, el tipo de

estructura a hormigonar y la densidad de armaduras (si las hubiera). Es prudente recalcar que debe elegirse el mínimo asentamiento compatible con una buena compactación.

La Tabla 3, adaptada de la Tabla 8 correspondiente al punto 6.6.3.10 del Reglamento CIRSOC 201 Vol. I, que vincula ámbitos de consistencia, rangos de asentamiento y métodos de compactación recomendados, puede servir de guía.

Tabla 3: Ámbitos de consistencia, asentamiento y métodos de compactación, extractados del Reglamento CIRSOC 201 Vol. 1, Punto 6.6.3.10

Ambito de consistencia	Aspecto del hormigón fresco	Gama (rango) de asentamientos [cm]	Métodos de compactación
Hormigón seco	suelto - tendencia a la segregación	1,0 a 4,5	Vibradores potentes alta frecuencia
Hormigón plástico	levemente cohesivo a cohesivo	5,0 a 9,0	Vibración o varillado o apisonado
Hormigón "blando"	cohesivo o levemente fluido	10,0 a 15,0	Varillado o vibración leve
Hormigón superfluidificado	fluido – tiende a segregarse	Mayor que 16 (*)	Varillado o muy leve vibración

De acuerdo con la información disponible, se elige el menor asentamiento posible que permita asegurar una correcta colocación, digamos 10 cm.

3. Decidir si se incorporará aire en forma intencional

La cantidad de aire necesaria puede estimarse de la Tabla 4. A medida que aumenta el tamaño máximo, disminuye la cantidad de aire necesaria para proveer una adecuada protección al hormigón frente a ciclos de congelamiento y deshielo. La incorporación intencional de aire influye también sobre la resistencia a la compresión y sobre la demanda de agua, es decir, el agua necesaria para obtener el asentamiento seleccionado en el Paso 2.

Como valores tentativos, puede estimarse una pérdida de resistencia del 5 % por cada 1 % de aire por encima del 1 %. Expresado como una ecuación, queda:

Tabla 4: Cantidad de aire incorporado en función del tamaño máximo (de Reglamento CIRSOC 201, Punto 6.6.3.8, Tabla 6).

Tamaño máximo del agregado grueso [mm]	13,2	19,0	26,5	37,5	53,0
Porcentaje de aire del hormigón [% en volumen]	7 ± 1,5	6 ± 1,5	5 ± 1	4,5 ± 1	4 ± 1

El Comité 211 del American Concrete Institute (ACI), define tres niveles de exposición posibles y, para cada uno de ellos, indica el contenido de aire incorporado recomendado, tal como se resume en Tabla 5.

Tabla 5: Contenido de aire incorporado (% en volumen) recomendado por el Comité ACI 211.1

Exposición	Tamaño máximo del agregado grueso					
	9,5 mm	13,2 mm	19,0 mm	26,5 mm	37,5 mm	53 mm
Suave	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0
Severa	7.0	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0

Exposición suave:	Hormigón expuesto al interior o al exterior que no estará sujeto a ciclos de congelamiento ni a sales descongelantes. Se aplica también cuando se incorpora aire para mejorar la trabajabilidad del hormigón.
Exposición moderada:	Durante la vida en servicio, es posible esperar congelamiento pero el hormigón no estará expuesto a la humedad o agua por largos períodos previos al congelamiento ni otros compuestos agresivos.
Exposición severa:	el hormigón estará expuesto a la acción de sales descongelantes u otros agentes químicos agresivos o estará en contacto con agua durante prolongados períodos previo a su congelamiento. Ej: pavimentos, tableros de puentes, revestimientos de canales, etc.

Para decidir la incorporación intencional de aire, es suficiente constatar si el hormigón estará expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y, además, si estará expuesto a agentes agresivos (agua de mar). En este ejemplo no se incorporara aire intencional.

4. Distribución granulométrica de agregados

- Seleccionar una curva o ámbito granulométrico apropiado
- Proporcionamiento de las fracciones disponibles para ajustarse a lo seleccionado en 4. (Mezcla de las distintas fracciones).
- Cálculo del Módulo de Finura del Agregado Total, contemplando el retenido sobre los tamices de la serie normal

La distribución granulométrica de los agregados tiene una influencia decisiva sobre las características de la mezcla y, en particular, sobre la economía. Existen diferentes criterios para “optimizar” la distribución de tamaños del agregado, pero siempre se debe tener en cuenta el concepto de “curva del agregado total”.

Algunas normas o reglamentos dan entornos de “preferencia”, como los dados por las normas DIN o IRAM 1627 y puede emplearse cualquiera de ellos para una primera aproximación.

El procedimiento de mezcla puede hacerse en forma gráfica (para dos o tres fracciones) o en forma analítica con el auxilio de un programa de optimización. Otra alternativa es realizar las mezclas en una planilla de Cálculo (Excel, Quattro-Pro). Usualmente, en pocos tanteos puede llegarse a una solución satisfactoria.

Una vez definidos los porcentajes de participación de cada una de las fracciones, se procede a calcular el MF (módulo de finura) del agregado total, parámetro de entrada en el Abaco 1 que se emplea en el punto 5 del método. Debe tenerse especial cuidado en considerar solamente aquellos tamices pertenecientes a la serie normal (75 mm; 37,5 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 600 μ m; 300 μ m y 150 μ m).

En nuestro caso, supondremos que el ajuste de las proporciones de agregado condujo a lo siguiente: 63 % de piedra partida (6-20), 18 % de arena gruesa y 19 % de arena fina. El MF del agregado total es 5,2, tal como se resume en Tabla 6 y se grafica a continuación:

Abertura Tamiz IRAM (mm)	Mezcla de Agregados		
	% Pasa	% Retenido	% Acumulad o
63	100,0	0	0
50	100,0	0	0
37,5	100,0	0	0
25,0	100,0	0	0
19,0	100,0	0	0
12,5	80,5	19.50	19.50
9,5	64,7	15.80	35.30
4,75	44,5	20.20	55.50
2,36	32,0	12.50	68.00
1,18	23,8	8.20	76.20
0,600	12,9	10.90	87.10
0,300	4,4	8.50	95.60
0,150	0,5	3.90	99.50

MF de la Mezcla:	5,17
------------------	------

5. Determinación de la cantidad de agua estimada de la mezcla, en función del asentamiento elegido y el MF del agregado total. (Abaco 1)

Empleando el Abaco 1 se identifica la curva que corresponda al MF del agregado total (mezcla de agregados, según punto 4 y la ordenada de la intersección de la curva con la vertical correspondiente al asentamiento seleccionado en el punto 2 corresponde al agua de mezclado estimada (en litros) para elaborar un metro cúbico de hormigón.

Este ábaco está diseñado para agregados gruesos redondeados (canto rodado) y por lo tanto, si se empleara piedra partida, el agua estimada debe incrementarse entre un 5 y un 10 %.

Si se hubiese decidido incorporar aire en forma intencional, el agua de mezclado debe reducirse tal como se indicara en el punto 3, es decir, a razón de un 2 a 3 % por cada 1 % de aire incorporado en forma intencional (por sobre 1%)

Para MF = 5,2 y As = 10 cm, extraemos del Ábaco 1 la cantidad de agua de mezclado = 173 litros

*Dado que el Ábaco está realizado para canto rodado, debe contemplarse un **incremento** de la cantidad de agua por uso de piedra partida, para el que adoptaremos el coeficiente **7 %**.*

Por lo tanto, la cantidad de agua corregida : $173 \times (1,07) = 185$ litros

Si se empleara algún aditivo reductor de agua, debe reducirse el agua de mezclado en el porcentaje indicado por el fabricante del producto. Si no se dispusiera de ese dato, puede estimarse entre un 5 y un 7 %, aunque con algunos productos la reducción puede llegar al 9 %.

6. Determinación de la resistencia de diseño de la mezcla (f'_{cr})

La determinación de la resistencia de diseño de la mezcla debe hacerse en función de los requerimientos de la obra (resistencia característica proyectada) y del tipo de elaboración y control

previstos para la etapa de ejecución. En la Tabla 1 se indicaron algunos valores típicos del desvío estándar esperable. Es recomendable verificar, en condiciones de producción en la obra, si el valor adoptado se corresponde con el valor real de la dispersión; en caso de ser necesario, debe hacerse un ajuste de la dosificación.

Tabla 1: Desvíos estandar típicos para distintas condiciones de elaboración y control

Condiciones de elaboración - Medición de componentes				Desvío estandar
Cemento	Agua	Agregados	Aditivos	MPa
en peso	en peso o volumen con precisión, descontando aporte de agua de los agregados	en peso con corrección por humedad y absorción	en peso o volumen con precisión	4,0
en peso	en peso o volumen con precisión, descontando aporte de agua de los agregados	en volumen, ajustando por humedad y esponjamiento	en peso o volumen con precisión	5,5
en peso (por bolsas enteras)	por volumen, ajustando por la cantidad necesaria para mantener constante la consistencia	en volumen	No recomendado	7.0

El Reglamento CIRSOC sugiere que se comparen dos valores, eligiendo el mayor de ambos. El primero [1], se calcula en forma análoga a lo expuesto anteriormente, pero emplea el coeficiente 1,34, y corresponde a una probabilidad de 1 en 100 que el promedio de cada tres valores consecutivos (media móvil) sea inferior a la resistencia especificada. El segundo valor [2] corresponde a una probabilidad similar de que los ensayos individuales sean menores que la resistencia especificada menos 3,5 MPa.

f'_{cr} será la mayor entre

$$f'_{cr} = f'_{ce} + 1,34 S \quad [1]$$

$$f'_{cr} = f'_{ce} + 2,33 S - 3,5 \text{ MPa} \quad [2]$$

Resistencia de diseño de la mezcla cuando no se conoce la desviación estandar:

RESISTENCIA ESPECIFICADA (f'_{ce}) MPa	RESISTENCIA DE DISEÑO DE LA MEZCLA (f'_{cr}) MPa
Igual o menor que 20	$f'_{c} + 7.0$
Entre 20 y 35 inclusive	$f'_{c} + 8.5$
Mayor que 35	$f'_{c} + 10.0$

En nuestro caso, para mayor simplicidad, emplearemos la fórmula indicada por el Reglamento CIRSOC 201, Resistencia de diseño de la mezcla cuando no se conoce la desviación estandar, adoptando entonces: $f'_{cr} = f'_{ce} + 8.5 = 30 \text{ MPa} + 8.5 \text{ MPa} = 38.5 \text{ MPa}$

7. Estimación de la relación a/c máxima

7a) Cálculo de la relación agua/cemento necesaria en función de la resistencia media a la edad de 28 días para las distintas categorías de cemento. (Abaco 2)

Con el dato de la resistencia media (f'_{cr}) calculada en el punto anterior y teniendo en cuenta la categorización por resistencia del cemento empleado, se estima del Abaco 2 la razón agua/cemento máxima que podrá emplearse en la mezcla. Este ábaco está diseñado para su empleo con agregados redondeados (canto rodado) y para una edad de 28 días.

Si se empleara piedra partida como agregado grueso, es lícito estimar un incremento de resistencia de un 20 %, por lo que el procedimiento razonable sería establecer, del Abaco 2, la relación agua/cemento que corresponda a una resistencia igual al 83 % (1/1,20) de la resistencia de diseño f'_{cr} .

Estimemos la relación agua/cemento máxima para el cumplimiento de la resistencia. Según el Abaco 2, ingresando al mismo con la categoría de cemento a emplear (CP40) y la resistencia media de la mezcla. La resistencia media de la mezcla deberá modificarse, en este caso, por el empleo de piedra partida.

Incremento de resistencia por el uso de piedra partida: 20 % (estimado)

La resistencia a determinar en el ábaco, una vez contemplado el incremento por el uso de piedra partida debe ser igual a la resistencia de diseño.

$$f'_{cr}(\text{ábaco}) \times 1,20 = 38,5 \text{ MPa}$$

$$f'_{cr}(\text{ábaco}) = 38,5 \text{ MPa} / 1,20 = 32 \text{ MPa}$$

Entonces, para 32 MPa y un CP 40, corresponde una relación agua/cemento máxima de 0,48.

7b) Verificación del cumplimiento de eventual relación agua/cemento máxima por razones de durabilidad.

La condición de exposición del hormigón determina, según los reglamentos, relaciones agua/cemento máximas por razones de durabilidad. En la Tabla 7 se indican los límites aconsejados por el Reglamento CIRSOC 201-1982. - *Página 61 de esta Publicación* -

Si la relación a/c elegida por resistencia no verifica los requisitos impuestos por la durabilidad, debe optarse por la relación que verifique simultáneamente ambas condiciones, es decir, la menor de ambas.

Es decir, la relación agua/cemento = 0,48 verifica las condiciones de resistencia y durabilidad.

8. Cálculo del contenido unitario de cemento. Verificación del cumplimiento de eventual contenido de cemento mínimo.

Con los datos ya obtenidos de relación agua/cemento y contenido de agua para elaborar un metro cúbico de hormigón, es sumamente sencillo calcular el contenido de cemento a emplear. A menudo, se hace mención al Contenido Unitario de Cemento (CUC) dado que es el cemento necesario para elaborar un metro cúbico

$$\text{C.U.C.} = \text{Agua para elaborar un metro cúbico} / (a/c)$$

Si existiera alguna limitación al contenido de cemento mínimo, ya sea porque es un aspecto contractual, reglamentario o por durabilidad, debe elegirse el mayor entre el calculado y el especificado.

$$\text{Contenido unitario de cemento} = \text{Agua de mezclado} / a/c = 185 / 0,48 = 385 \text{ kg/m}^3$$

9. Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso 4.

Cuando los pesos específicos de los distintos agregados o fracciones que se emplean son similares, resulta indistinto trabajar con las proporciones en peso o en volumen, mientras que si son significativamente diferentes entre sí, debe trabajarse con ecuaciones en volumen solamente.

Un procedimiento que simplifica el diseño de la mezcla es construir una Tabla resumen, tal como la que se indica a continuación:

Tabla resumen del proceso de diseño

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón (1) kg	Densidad (2) kg/dm3	Volumen sólido (3) dm3
Agua			
Cemento			
Ag. grueso 1			
Ag. grueso 2			
Ag. fino 1			
Ag. fino 2			
Aire	---		
Aditivo			
SUMAS			

(1) Valores obtenidos siguiendo el método adoptado.

(2) Corresponde a los agregados en condición de seco en estufa. Si no hay datos experimentales, se adopta 3,15 kg/dm3 para el cemento Portland sin adiciones.

(3) Se calcula dividiendo la columna de (1) por la columna (2). La suma de volúmenes sólidos, en dm3, debe ser 1000. De no existir datos experimentales, el aire naturalmente incorporado se estima en 1 - 1,5 % (o sea, entre 10 y 15 litros por metro cúbico de hormigón).

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón kg	Densidad kg/dm3	Volumen sólido dm3
Agua	185	1	185
Cemento	385	3,10	124
Ag. grueso		2,65	
Arena gruesa		2,65	
Arena fina		2,65	
Aire	---		
Aditivo			
SUMAS			1000

Para completar el metro cúbico (1000 litros), podemos calcular fácilmente que quedan libres 691 litros de la mezcla, los que deben completarse con los agregados en las proporciones adecuadas.

Si recordamos que del paso 4 concluimos en que las proporciones de arena fina, arena gruesa y piedra partida 6-20 son 19 %, 18 % y 63 % respectivamente, podemos simplemente emplear estas proporciones en forma directa, dado que las densidades relativas de los agregados son idénticas. Esto es, el volumen sólido ocupado por la arena fina será 691 litros x 0,19 = 131 litros. El volumen sólido ocupado por la arena gruesa será 691 litros x 0,18 = 125 litros y el ocupado por la piedra, 691 x 0,63 = 435 litros.

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón kg	Densidad kg/dm3	Volumen sólido dm3
Agua	185	1	185
Cemento	385	3,10	124
Ag. grueso		2,65	435
Arena gruesa		2,65	125
Arena fina		2.65	131
Aire	---		
Aditivo			
SUMAS			1000

Luego, se calcula el peso de cada uno de los componentes multiplicando el volumen sólido (col. 3) calculado para cada uno por su correspondiente densidad relativa seca.

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón kg	Densidad kg/dm3	Volumen sólido dm3
Agua	185	1	185
Cemento	385	3,10	124
Ag. grueso	1152	2,65	435
Ag. fino 1	334	2,65	125
Ag. fino 2	347	2.65	131
Aire	---		
Aditivo			
SUMAS			1000

Sólo nos queda completar la columna correspondiente a los pesos SSS. Para ello, tendremos que multiplicar cada peso del agregado (columna 1) por el término $(1 + A\%/100)$. Los valores correspondientes al cemento y el agua no cambian, es decir, se transcriben los de la columna 1.

Se cuenta con una piedra partida granítica 6-20 y arenas de río gruesa y fina, todas con densidad relativa 2,65 y absorción de 0,5%, 0,6% y 0,8% respectivamente

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón kg	Densidad kg/dm3	Volumen sólido dm3	Peso (SSS) por m3 de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m3 kg
Agua	185	1	185	185	
Cemento	385	3,10	124	385	
Ag. grueso	1152	2,65	435	1157	1163
Arena gruesa	334	2,65	125	336	344
Arena fina	347	2.65	131	350	363
Aire	---				
Aditivo					
SUMAS			1000	2413	

La suma de la columna (4) da una indicación del peso de la unidad de volumen o peso unitario en estado fresco, es decir, el PUV calculado del hormigón es 2413 kg/m3.

Si en las condiciones reales de obra se cuenta con arena fina con un contenido de humedad de 4,5 %, arena gruesa con una humedad de 3 % y piedra con una humedad del 1 %, la última columna se completa como sigue:

Calcular el peso húmedo de los agregados, empleando la fórmula $Ph = Ps (1 + h\%/100)$

Ph (Ag. grueso) = 1152 kg x (1,01) = 1163 kg

Ph (Ar. gruesa) = 334 kg x (1,03) = 344 kg

Ph (Ar. fina) = 347 kg x (1,045) = 363 kg

Efectuar las diferencias, con su signo, entre el peso húmedo y el peso (SSS) de los agregados.

Ph (Ag. grueso) - P_{sss} (Ag. grueso) = 1163 kg – 1157 kg = 6 kg

Ph (Ar. gruesa) - P_{sss} (Ar. gruesa) = 344 kg – 336 kg = 8 kg

Ph (Ar. fina) - P_{sss} (Ar. fina) = 363 kg – 350 kg = 13 kg

Total = 27 kg = 27 litros

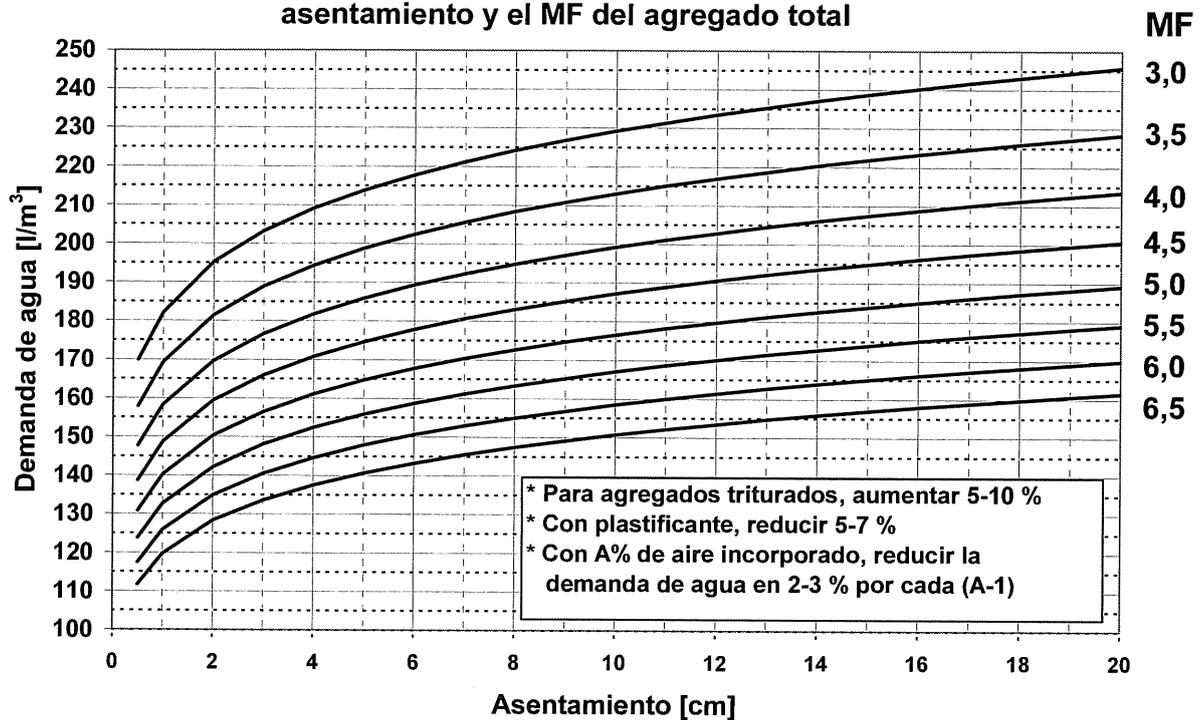
Restar al agua de mezclado la suma de las diferencias obtenidas (con su signo). Como control, la suma de los valores de la columna de pesos húmedos debe coincidir con la correspondiente a los pesos SSS.

Agua a emplear en el amasado = 185 litros – 27 litros = 158 litros

Componente	Peso para 1 m3 de hormigón kg	Densidad kg/dm3	Volumen sólido dm3	Peso (SSS) por m3 de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m3 kg
Agua	185	1	185	185	158
Cemento	385	3,10	124	385	385
Ag. grueso	1152	2,65	435	1157	1163
Arena gruesa	334	2,65	125	336	344
Arena fina	347	2.65	131	350	363
Aire	---				
Aditivo					
SUMAS			1000	2413	2413



Abaco 1: Demanda de agua del hormigón en función del asentamiento y el MF del agregado total



Abaco 2: Relación a/c vs Resistencia del hormigón a la edad de 28 días para distintas categorías de cemento

