



GRUPO

INETTI

Guía Práctica

DISEÑAR Y OBTENER HORMIGONES DURABLES

► Introducción	1
▼ 1. Los constituyentes del Hormigón	2
► 1.1 El cemento	2
► 1.2 El agua de amasado y/o curado	6
► 1.3 Los agregados	7
► 1.4 Los aditivos	12
▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido	15
► 2.1 Composición del hormigón	15
► 2.2 Trabajabilidad y consistencia	18
► 2.3 Elaboración y transporte	20
► 2.4 Uso y compactación	22
► 2.5 Curado	24
► 2.6 Encofrado	25
► 2.7 Hormigonado a temperaturas elevadas	28
► 2.8 Hormigonado a bajas temperaturas	30
▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón	32
► 3.1 Segregación	32
► 3.2 Fisuración	33
► 3.3 Carbonatación y corrosión de la armadura	36
► 3.4 Eflorescencias	37
► 3.5 Acción del hielo y de las sales anti-hielo	39
► 3.6 Acción de los sulfatos	41
► 3.7 Acción de los productos químicos	41
► 3.8 Reacción álcali - agregado	43
► 3.9 Resistencia al fuego	43
► Soluciones personalizadas	45
► Bibliografía	46



Existen numerosas directivas para la elaboración y la colocación del hormigón. Éstas contienen a menudo indicaciones más o menos generales normalmente insuficientes para aquellos que trabajan en obras y se enfrentan directamente con problemas concretos.

Como productor, el Grupo Minetti quiere llenar este vacío publicando la Guía Práctica. Cada estadio de la confección y de la elaboración del hormigón está caracterizado por "gajes del oficio" provenientes de la experiencia práctica, transmitidos oralmente de persona a persona. La Guía Práctica hace accesible a todos este importante bagaje de conocimientos. Contiene las informaciones y las directivas generales que se encuentran habitualmente en los manuales y en los textos de referencia.

La Guía Práctica se orienta a todos aquellos que asumen una función de responsabilidad en la obra: el encargado y/o director de la obra. También el ingeniero encargado del proyecto, el maestro mayor de obra y el empresario edilicio encontrarán en este prospecto informaciones interesantes y prácticas, especialmente en lo que respecta a la realización de proyectos y a la puesta en marcha.

La Guía Práctica contribuye a eliminar estos inconvenientes. Siguiendo sus consejos, el lector rápidamente se dará cuenta que no es difícil elaborar un hormigón de buena calidad respetando reglas tradicionales y aplicando métodos simples.

Las características específicas de un proyecto pueden de todos modos requerir procedimientos constructivos particularmente complejos. El buen resultado de tales proyectos requerirá de personal con un nivel de calificación superior y un control muy atento de la puesta en marcha y de la calidad. En estos casos el equipo de Asistentes Técnicos del Grupo Minetti pone gustosamente a disposición su gran experiencia en la materia.

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.1 El cemento

1.1 EL CEMENTO

Generalidades

El cemento es un ligante hidráulico, o sea una sustancia que mezclada con el agua, está en condiciones de endurecer ya sea al aire, como 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.

Historia

Los romanos utilizaban en la antigüedad una mezcla hidráulica compuesta de calcáneos arcillosos con agregados de puzolana o bien harina de laterita. Con los agregados apropiados, ellos estaban en condiciones de producir el Opus Caementitium o "cemento romano", precursor de nuestro hormigón y que dio origen al término cemento.

En 1824, el inglés J. Aspdin, elaboró y patentó un producto similar al cemento, obtenido mediante la cocción de una mezcla de calcáneos y arcilla finamente molida. Este ligante permitía confeccionar un hormigón similar al obtenido con la piedra de Portland (calcáreo muy resistente de la isla de Portland) comunmente utilizado en Inglaterra para la construcción. De aquí la denominación "cemento Portland"

Fabricación

La fabricación del cemento Portland consiste en la preparación de una mezcla de materias primas con granulometría definida, sometida a cocción hasta el umbral del punto de fusión y finalmente molida a polvo fino y reactivo: el cemento

Globalmente se pueden distinguir cuatro etapas en la fabricación del cemento:

1.Extracción y triturado de la materia prima:

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

La piedra bruta es pretriturada en la cantera (fig. 1.1.1) hasta el tamaño de un puño.

2.Mezclado y reducción de la materia prima hasta una finura similar a la de la harina:

Esta etapa prevé el mezclado de las diversas materias primas en las proporciones correspondientes a la composición química óptima. El material que se encuentra en el molino a bolas o vertical (fig.1.1.2) es simultáneamente secado y triturado en fino polvo. A la salida se obtiene la harina cruda que será mezclada en los silos de homogeneización hasta la obtención de una composición uniforme.

3.Cocción de la harina y transformación en clinker:

El proceso de cocción a una temperatura de aproximadamente 1.450°C es la operación principal en la fabricación del cemento. Antes de entrar en el horno rotativo (fig. 1.1.3), la harina pasa a través de un cambiador térmico y se calienta a casi 1.000°C. A la salida del horno el material se presenta bajo la forma de clinker incandescente que será rápidamente enfriado al aire. Los combustibles utilizados son: carbón, petróleo, gas natural y, cada vez más frecuentemente, materiales recuperados como solventes, aceites usados o neumáticos viejos.

4.Molienda del clinker con yeso y aditivos:

Para obtener el material reactivo deseado, el clinker es molido en la unidad de molienda (fig. 1.1.4) con una pequeña cantidad de yeso (regulador de fraguado).



FIG. 1.1.1. Vehículos pesados trabajando en una cantera.



FIG. 1.1.2 Molino vertical para la reducción a harina de la mezcla de materias primas.



FIG. 1.1.3 Horno rotativo, corazón de una cementera.



FIG. 1.1.4 Vista interna de un molino de bolas para el molido del clinker y el yeso en cemento

Según el tipo de cemento se agregan al clinker, durante la molienda, compuestos minerales (cal cáreos, puzolana, escoria de alto horno, cenizas volantes) para formar los llamados cementos portland con adiciones.

Control de calidad del cemento

La calidad de los cementos argentinos está garantizada por un triple procedimiento:

Control interno de la fabricación.

Certificación oficial del sistema de gestión de calidad.

Control por medio de un organismo externo.

Control interno de la fabricación

En todas las fases de la fabricación, desde la cantera hasta la expedición, se toman y analizan muestras. Una cuidadosa vigilancia de la producción, garantiza una calidad elevada y constante. El tratamiento estadístico de los resultados de los muestreos al momento de la expedición, debe responder constantemente a las exigencias previstas en la norma IRAM.

Sistema de gestión de la calidad

La producción de los cementos argentinos responde a un sistema de calidad y de *management* certificado según las normas ISO de la serie 9000.

Organo externo de control

El control interno de la fabricación se complementa con un órgano independiente de control externo. Este control es efectuado con muestras tomadas ad hoc en la cementera y actualmente es llevado a cabo por el CECON (INTI).

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.1 El cemento

Los tipos de cemento y su composición según la norma IRAM 50.000

La norma IRAM 50.000 clasifica los cementos en las categorías indicadas en la tabla 1.1.1.a

Composición (g/100g) TIPO DE CEMENTO	Nomenclatura	Composición (g/100g)			
		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	Dos o más, con P+E+F<=35		
Cemento portland puzolánico	CPP	85-50	15-50		
Cemento de alto horno	CAH	65-25		35-75	

Tabla 1.1.1.a. Composición de los cementos según la norma IRAM 50.000

Para ciertas aplicaciones, puede resultar conveniente emplear cementos que posean determinadas propiedades especiales, según el siguiente listado definido en la norma IRAM 50.001. (Tabla 1.1.1.b)

Denominación	Designación
de Alta Resistencia Inicial	ARI
Moderadamente Resistente a los Sulfatos	MRS
Altamente Resistente a los Sulfatos	ARS
de Bajo Calor de Hidratación	BCH
Resistente a la reacción Alkali - Agregado	RRAA
Blanco	B

Tabla 1.1.1.b
Cementos con propiedades especiales

Las categorías de resistencia

Los cementos están subdivididos en tres categorías de resistencia caracterizadas por los valores 30, 40, 50, según tabla 1.1.2.

Clase de resistencia 2 días	Resistencia a la compresión (MPa)				Método de ensayo
	7 días		28 días		
CP 30	--	Mín. 16	Mín. 30	Máx. 50	IRAM 1422
CP 40	Mín. 10	--	Mín. 40	Máx. 60	
CP 50	Mín. 20	--	Mín. 50	--	

Tabla 1.1.2
Categoría de resistencia de los cementos según la norma IRAM 50.000

Nota: En todos los casos, los valores de resistencia obtenidos a los 28 días deberán ser mayores que los obtenidos a los 2 días y a los 7 días.



Campo de aplicación de los cementos

La tabla 1.1.3 resume los distintos tipos de cementos Minetti, indicados más detalladamente en el folleto de productos.

Tipos de cemento	Norma IRAM	Franja envase	Usos y recomendaciones
Cemento Portland Compuesto CPC	1730	Anaranjado	Cemento Portland de uso general. Obras hidráulicas, hormigones en masa, fundaciones y estructuras en medios agresivos.
Cemento Portland Fillerizado CPF	1592	Marrón	Cemento Portland de uso general. No indicado para estructuras en medios agresivos.
Cemento Portland Puzolánico CPP	1651	Azul	Cemento Portland de uso general. Obras hidráulicas, hormigones en masa, fundaciones y estructuras en medios agresivos.
Cemento de Alto Horno CAH	1630	Negro	Obras hidráulicas, hormigones en masa, fundaciones y estructuras en medios agresivos.
Cemento Portland Normal CPN	1503	Color del papel	Cemento Portland de uso general. No indicado para estructuras en medios agresivos.
Cemento de Albañilería	1685	Violeta	Albañilería. No apto para estructuras.

Tabla 1.1.3. Tipos de cementos Minetti.

Hidratación del cemento

El cemento mezclado con agua reacciona hidratándose. Esta reacción libera una cierta cantidad de calor y provoca el progresivo endurecimiento de la pasta de cemento.

La hidratación proporciona esencialmente dos productos principales (fig. 1.1.5):

- agujas (silicatos de calcio hidratado o CSH) de lento crecimiento con tendencia pronunciada a la compactación, responsable de la formación de una matriz densa y resistente;

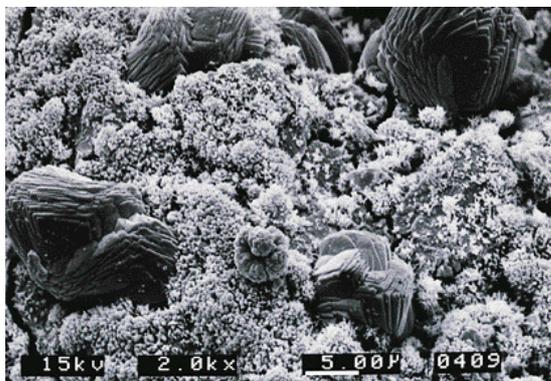


FIG. 1.1.5 Piedra de cemento endurecida observada al microscopio de barrido electrónico (SEM) (línea blanca = 0,005 mm).

- pequeñas placas de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), muy alcalinas, sin aporte a la resistencia pero adecuadas para proteger a la armadura de la corrosión.

Almacenamiento y conservación del cemento

El cemento puede conservarse indefinidamente, sin deteriorarse, en la medida en que esté protegido de la humedad, incluyendo la existente en el aire. En las plantas de hormigón, en las obras y en el transporte de larga duración, el cemento tiende a deteriorarse, por lo que deben observarse ciertas precauciones para su almacenamiento.

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 circu-

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.1 El cemento

▶ 1.2 El agua de amasado y/o curado

lación 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.

Cemento a granel:

El cemento almacenado en los grandes silos de las plantas de cemento de distribución puede permanecer largos períodos sin deteriorarse.

Para minimizar la formación de grumos duros durante el transporte y almacenamiento a granel, se recomienda:

- Inspeccionar periódicamente la estanqueidad de las compuertas de carga de los vehículos de transporte a granel.
- Mantener las compuertas cerradas cuando no se las usa.
- Usar sistemas de aire comprimido con trampas de agua.
- Inspeccionar regularmente los silos por posibles grumos o pegas.

Indicaciones de seguridad

El cemento es un ligante hidráulico. En contacto con el agua o con la humedad se produce una reacción alcalina. Dentro de lo posible se debe evitar el contacto con la piel. En caso de contacto con los ojos, enjuagar inmediatamente con abundante agua, y consultar al médico.

1.2 EL AGUA DE AMASADO Y/O CURADO

Generalidades

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.

Requisitos para el agua de amasado

Los requisitos físicos y químicos que el agua de amasado deberá cumplimentar, están especificados en la norma IRAM 1601. En ella se establecen los valores en cuanto a su influencia

REQUISITOS	UNIDAD	MINIMO	MAXIMO	
Residuo sólido	mg/dm ³	--	5000	
Materia orgánica, expresada en oxígeno consumido	mg/dm ³	--	3	
pH	mg/dm ³	5,5	8	
Sulfato, expresado como SO ₄ ²⁻	mg/dm ³	--	1000	
Cloruro expresado como Cl ⁻	Para emplear en hormigón simple	mg/dm ³	--	2000
	Para emplear en hormigón armado convencional	mg/dm ³	--	700
	Para emplear en hormigón pretensado	mg/dm ³	--	500
Hierro, expresado como Fe	mg/dm ³	--	1	

Tabla 1.2.1 Requisitos para el agua de amasado Norma IRAM 1601

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.2 El agua de amasado y/o curado

▶ 1.3 Los agregados



sobre el tiempo de fraguado y a la resistencia a la compresión.

En cuanto los requisitos químicos, el agua para el mezclado y/o curado de hormigones deberá cumplimentar lo establecido en la tabla 1.2.1.

1.3 LOS AGREGADOS

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 de 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.

Cada elemento tiene su rol dentro de la masa de hormigón y su proporción en la mezcla es clave para lograr las propiedades deseadas, esto es: trabajabilidad, resistencia, durabilidad y economía.

Influencia de los aridos en las propiedades del hormigón

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

Clasificación:

En general los agregados se pueden dividir en estos tipos:

Forma	Áridos naturales		Áridos triturados	
	Esférica	Alargada/aplanada	Cúbica	Alargada/aplanada
Angulosidad				
	Redondeada		Angulosa	
Superficie	Lisa		Aspera	
Necesidad de agua	←		Creciente →	
Trabajabilidad	←		Decreciente →	
Compactación	←		Decreciente →	

Tabla 1.3.1 Relación entre la forma y las características de los granos.

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.3 Los agregados

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).

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.

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.

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.

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. En la tabla 1.3.2 se muestra el cálculo de este módulo:

La norma IRAM 1627 -Agregados - Granulometría de los Agregados para Hormigones establece los límites de granulometría donde debe estar comprendida la arena (Fig. 1.3.1) y las distintas fracciones de agregado grueso a fin de que sean aptos para la elaboración de hormigones.

El tamaño máximo de partícula es otro parámetro que caracteriza a un agregado. Se define como el tamiz IRAM de menor abertura a través del cual puede pasar el 95% del agregado.

Lo que más importa en el hormigón es la granulometría que ha de tener la mezcla de las diferentes fracciones de agregado grueso y la arena (agregados totales). La norma IRAM 1627 también indica las granulometrías que deben tener las mezclas totales para los diferentes tamaños máximos de piedra (Fig. 1.3.2).

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

Tamices IRAM	Retenido Individual [g]	Retenido Acumulado [g]	Retenido Individual [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
9.5 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
4.75 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
2.36 mm	30.0	30.0	6.0	6.0	94.0
1.18 mm	158.0	188.0	31.6	37.6	62.4
600 µm	148.0	336.0	29.6	67.2	32.8
300 µm	97.0	433.0	19.4	86.6	13.4
150 µm	43.5	476.5	8.7	95.3	4.7
Fondo	23.5	500.0	4.7	100.0	0.0

Tabla 1.3.2 Cálculo del módulo de finura de una arena.

El módulo de finura se calculará como:

$$\frac{\sum_{\substack{\text{tamiz } 150 \mu\text{m} \\ \text{tamiz } 75 \mu\text{m}}} \text{Retenidos acumulados [\%]}}{100} = \frac{0.0+0.0+6.0+37.6+67.2+86.6+95.3}{100} = 2.93$$

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.3 Los agregados

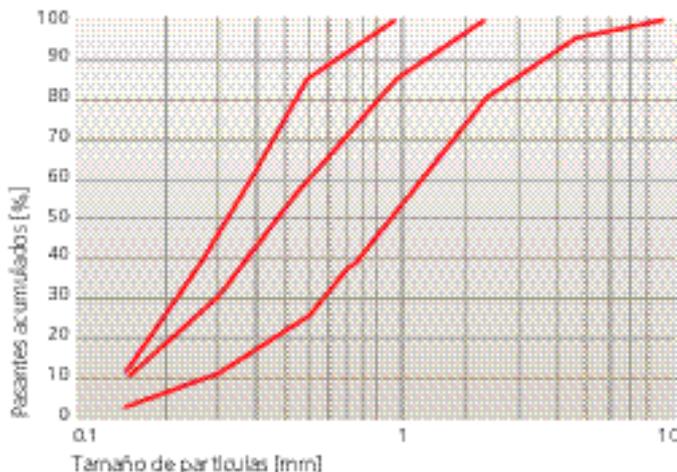


FIG. 1.3.1 Curvas límites para arenas utilizadas en hormigones IRAM 1627 "Agregados para hormigones"

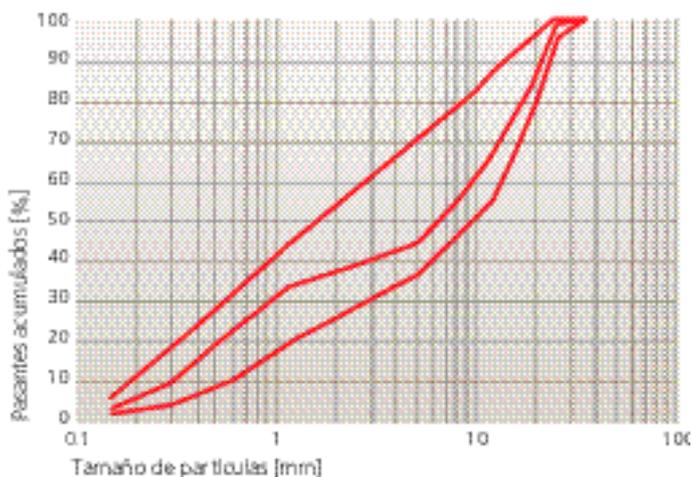


FIG. 1.3.2 Curvas límites para agregados totales para hormigones - Tamaño máximo 26.5 mm IRAM 1627 "Agregados para hormigones"

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 (Fig. 1.3.3).

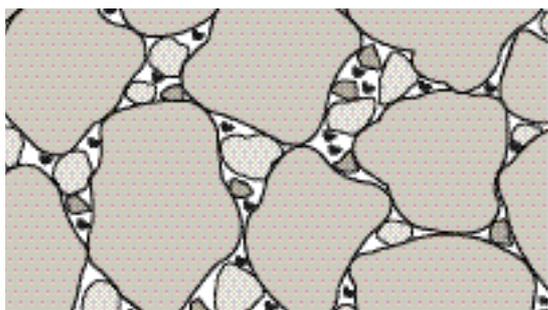


FIG. 1.3.3 Áridos de granulometría continua - mínimos vacíos

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 de los agregados mayor será la cantidad de pasta necesaria (Fig. 1.3.4).

Se ve que el tamaño máximo debe ser el mayor posible, esto es el máximo compatible con la estructura a hormigonar. Por ejemplo: para un tabique será 19 mm, para un pavimento 50 mm, para el hormigón en masa de una presa 120 mm.

Contenido de finos

El contenido de finos o polvo no se refiere al contenido de arena fina ni a la cantidad de piedras de tamaño menor, sino a la suciedad que presentan los agregados (tamaños inferiores a 0,075 mm).

El contenido de finos es importante por dos aspectos:

- a mayor suciedad habrá mayor demanda de agua, ya que aumenta la superficie a mojar y por lo tanto también aumentará el contenido de cemento si se quiere mantener constante la relación agua/cemento;
- si el polvo está firmemente adherido a los agregados, impide una buena unión con la pasta y por lo tanto la interfase mortero-agregado será una zona débil por donde se puede originar la rotura del hormigón.

Es difícil de apreciar a simple vista si las arenas tienen finos, pero se puede evaluar cualitativamente de las siguientes maneras:

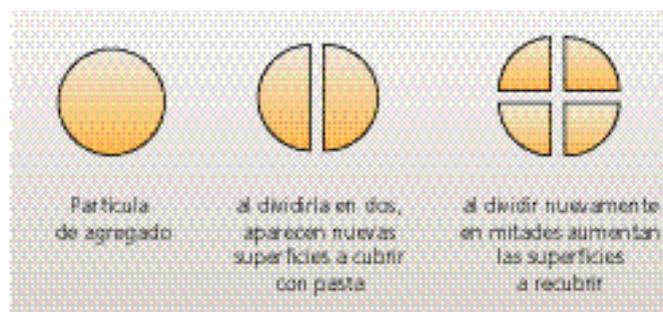


FIG. 1.3.4

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.3 Los agregados

- observando los acopios, pueden notarse en su superficie costras duras originadas por el desecamiento de estos finos;
- haciendo una simple prueba consistente en colocar un poco de arena en un recipiente translúcido con agua, agitar enérgicamente y dejar reposar un par de minutos. Si la arena está sucia se diferenciará claramente en el fondo del recipiente el depósito de arena y sobre éste, el de material fino.

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 1.3.1).

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 la flexotracción, por lo que son los preferidos para pavimentos para carreteras.

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 trabaja-

bilidad deseada (tabla 1.3.1), pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración.

En el caso de los canto rodados, su superficie es lisa, dan mejor trabajabilidad al hormigón pero menor adherencia pasta - agregado.

El caso de los canto rodados triturados plantea una situación intermedia entre las anteriores.

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 a continuación en la figura 1.3.5

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 que las arenas ocupan diferentes volúmenes de acuerdo a la humedad, por un fenómeno denominado esponjamiento.

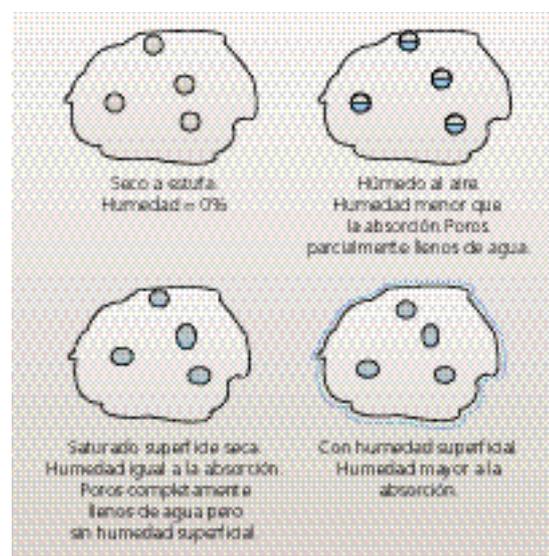


FIG. 1.3.5



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 (Fig. 1.3.6).

Debemos 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.

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 comunmente 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.

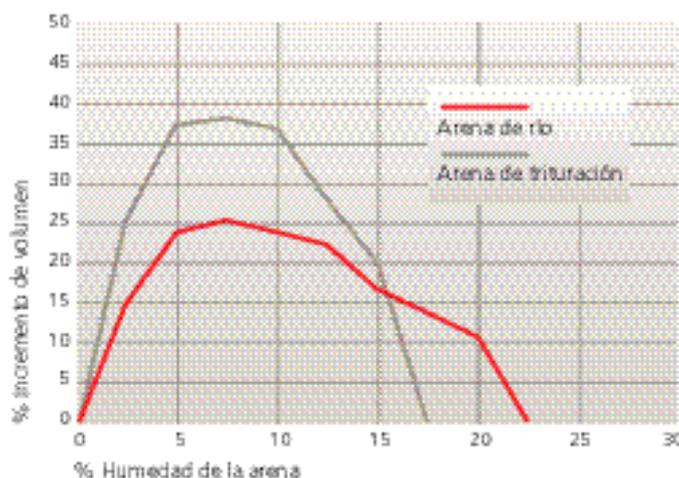


FIG. 1.3.6 Esponjamiento de arenas en función de su contenido de humedad.

Inestabilidad

Un agregado se considera inestable cuando sus cambios volumétricos pueden afectar la integridad del hormigón dando lugar a disgregaciones o fisuras. Las variaciones de volumen en los agregados pueden producirse principalmente en zonas de bajas temperaturas debidas a alternancias entre ciclos de hielo y deshielo.

Por esto es necesario verificar este aspecto del agregado mediante ensayos adecuados, tales como el tratamiento del agregado con sulfato sódico.

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 ser utilizados 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 donde se dispone de agregados reactivos

Requerimientos normativos

Los requerimientos físico-químicos de los agregados finos y gruesos que garantizan 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.

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.4 Los aditivos

Aditivo	Efectos principales
Fluidificantes	Reducción de la necesidad de agua y/o mejoramiento de la trabajabilidad.
Super-fluidificantes	Pronunciada reducción de la necesidad de agua y/o mejoramiento de la trabajabilidad para la obtención de un hormigón fluido.
Incorporadores de aires	Producción y dispersión de minúsculas burbujas de aire en la masa del hormigón para una mejor resistencia al hielo / sales anti-hielo.
Retardadores de fragüe	Demora en el inicio del fraguado del hormigón.
Aceleradores de fragüe	Aceleración del fraguado y del endurecimiento del hormigón, sobre todo a bajas temperaturas.

Tabla 1.4.1 Efectos principales de los aditivos.

1.4. LOS ADITIVOS

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.

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 airea-

dores. Es necesario evitar las dosificaciones inferiores al nivel de precisión de las balanzas convencionales. 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.

Tipos principales de aditivos

Fluidificantes (F, SF)

Los fluidificantes (F) y los superfluidificantes (SF) decididamente son los aditivos más utilizados para la elaboración del hormigón. La eficacia de estos aditivos está claramente representada en la fig. 1.4.1.

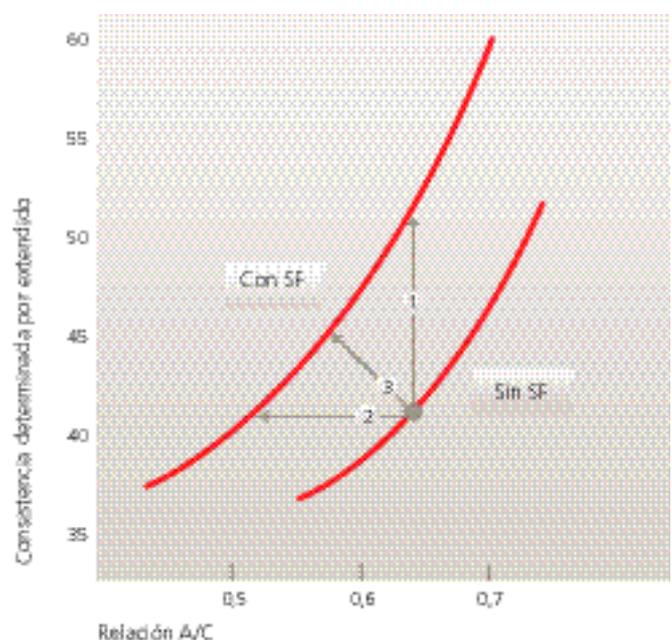


FIG. 1.4.1 Efecto de un superfluidificante (SF).



- los fluidificantes mejoran la trabajabilidad del hormigón en presencia de una relación A/C constante (cantidad de agua de mezcla inalterada) ("1");
- 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 ("2"). 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 ("3").

Finalmente y no por esto de menor importancia, se citan la ventaja económica, la mejor 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.

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 anticongelantes (ver cap. 3.5). Como resultado además se obtiene el mejoramiento de la trabajabilidad y la disminución de la segregación.

Regla práctica: El 1% de aire introducido en el hormigón corresponde a una disminución de la cantidad de agua de amasado igual a 5 l/m^3 y produce una trabajabilidad similar a la que se obtendría con el agregado de 10-15 Kg de agregados finos.

La pérdida de resistencia es un efecto indeseable que se produce con el uso de los incorporadores de aire.

Regla práctica: a cada % 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, reduciendo así el riesgo de disgregación del conglomerado (fig. 1.4.2) que resulta de la formación del hielo.

En la mayor parte de los casos, es suficiente una pequeña cantidad de aditivo para obtener el tenor deseado de aire introducido. Este representa 3-6 % del volumen del hormigón. En cada caso se establece que el tenor de aire contenido en el hormigón no depende solamente del tipo y de la dosificación del aditivo sino también de otros factores: tipo de cemento, naturaleza del agregado y curva granulométrica del arena, consistencia, temperatura, intensidad y duración del mezclado, presencia de ulteriores aditivos o materiales agregados. La compatibilidad de nuevas combinaciones debe ser absolutamente probada mediante exámenes preliminares.

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 sin 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.

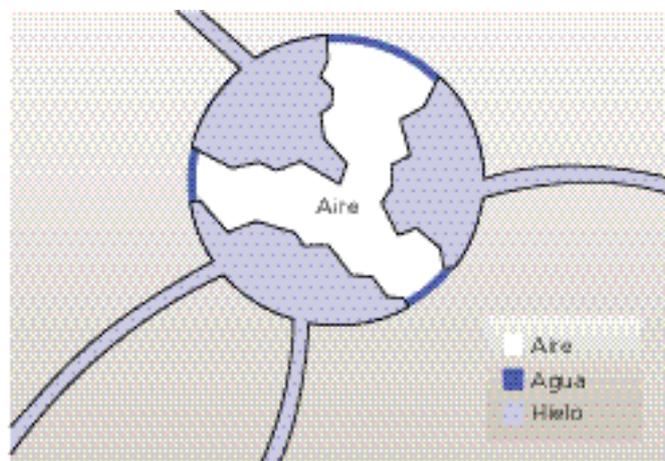


FIG. 1.4.2 Formación de hielo.

▼ 1. Los constituyentes del hormigón

▶ 1.4 Los aditivos

- 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 (fig. 1.4.3), 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. Dado que el efecto deseado depende fuertemente del tipo de retardante como también del cemento utilizado y de la temperatura ambiental, es absolutamente indispensable la ejecución de exámenes preliminares a diversas temperaturas. En el caso de una dosificación en exceso, el efecto de los retardadores puede llegar a inhibir el fraguado o, por el contrario, ser invertido, transformándolos en acelerantes.

Acelerantes

Los acelerantes y los productos anticongelantes 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 intervalo de tiempo bastante más corto.

El efecto de aceleración depende en gran medida de su constitución química y de la del cemento utilizado. Prácticamente, éstos causan siempre una pérdida más o menos importante de la resistencia final del hormigón (Tab. 1.4.2).

En el caso de una dosificación excesiva, se observa una demora más que una aceleración del fraguado y el endurecimiento (efecto contrario).

Los acelerantes en base a cloruros usados en el pasado no se emplean más porque favorecen la acción corrosiva de la armadura.

Siendo difícil cuantificar su efecto, los acelerantes son utilizados sólo en casos particulares:

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

No obstante que el agregado de los aditivos permite a menudo obtener interesantes prestaciones, no se debe olvidar el hecho que éstos introducen una mayor complejidad en el sistema agregado - agua - cemento. Por esta razón es que el uso de los aditivos requiere mucha atención por parte del usuario.

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.

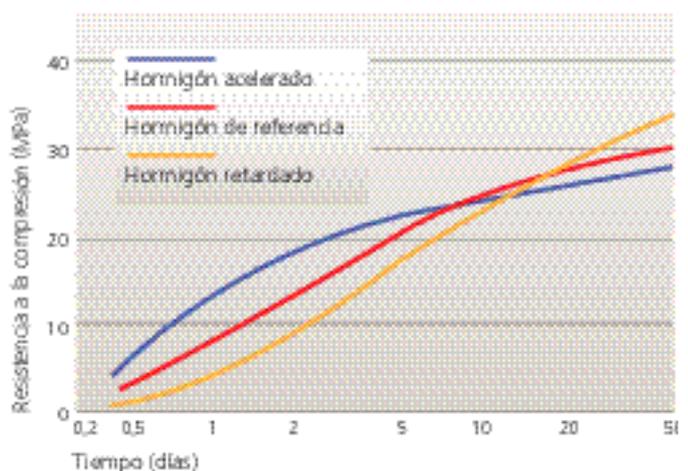


FIG. 1.4.3 Resistencia mecánica del hormigón: efecto de los retardadores y de los acelerantes.



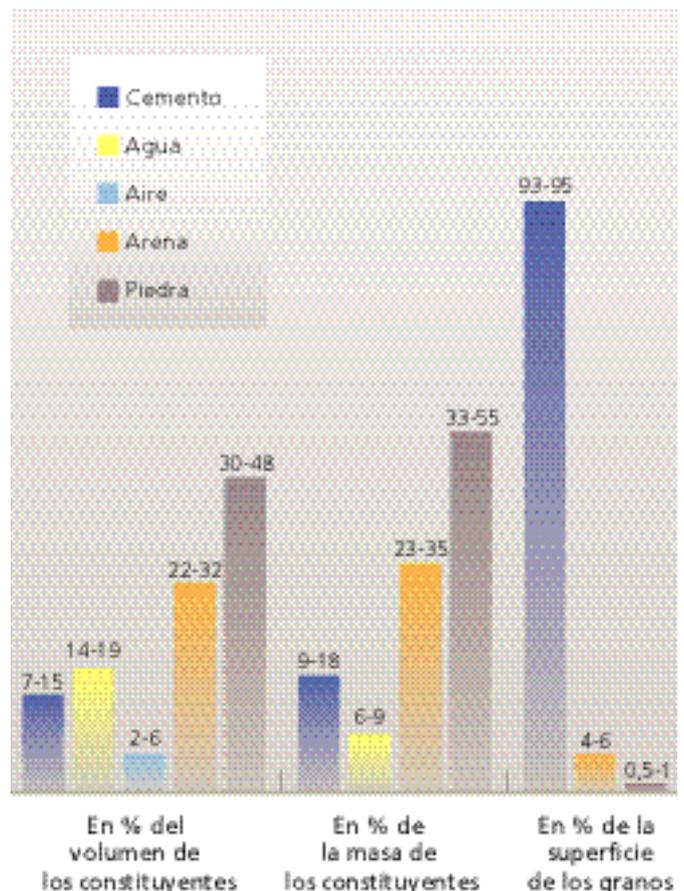
Efecto sobre	Fluidificante	Acelerantes de fragüe	Retardadores de fragüe	Incorporadores de aire
Trabajabilidad	++	-	+	+
Segregación/bleeding	+		-	+
Fraguado - aceleración	++			
- retardo	++			
Comportamiento frente al bombeo	+			
Resistencia inicial	+	++	-	-
Resistencia final	+	-	+	-
Permeabilidad	+	-		+
Resistencia al hielo en presencia de sales anti-hielo	+	-	-	++
Hormigonado a bajas temp.	+	+	-	
Hormigonado a temp. elevadas		-	+	
++efecto deseado + efecto positivo - riesgo de efectos no deseados				

TABLA 1.4.2 Efectos de cuatro tipos principales de aditivos.

2.1 COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN

En la figura 2.1.1 se nota claramente cómo los agregados constituyen el elemento predominante del hormigón, ya sea desde el punto de vista volumétrico como en relación al peso. A fin de asegurar la trabajabilidad del hormigón fresco como así también la hidratación del cemento, el agua de amasado debe mojar completamente la superficie de los granos de la mezcla. Es entonces interesante observar los constituyentes del hormigón desde la óptica de la superficie que aportan. En este sentido, sin dudas el cemento es el elemento dominante. Este es además el único componente que, reaccionando con el agua, está en condiciones de desarrollar resistencias mecánicas.

FIG. 2.1.1 Composición del hormigón



▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

► 2.1 Composición del hormigón

Dosificación del hormigón

Para la determinación de la composición del hormigón, o sea su dosificación, es necesario que los productores tengan en cuenta sobre todo las siguientes características:

- Trabajabilidad.
- Resistencia mecánica.
- Durabilidad.
- Costo.

Importancia de la relación agua/cemento (relación A/C)

La relación A/C es uno de los factores clave que tienen influencia sobre el conjunto de propiedades del hormigón (fig. 2.1.2). Describiendo las propiedades que debe tener el hormigón, el ingeniero fija a menudo la relación A/C. De todos modos en la práctica es relativamente difícil medir con precisión el contenido de agua en el hormigón. Es por esto, que muchas veces, en el momento de la elaboración, se hace referencia a la medida de consistencia. Como la consistencia está en estrecha relación con el contenido de agua, resulta más simple determinar las variaciones en el contenido de agua de un hormigón determinado a través de los cambios en su consistencia. Con cierta experiencia, este método ofrece una precisión aceptable.

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, no formula una exigencia precisa de la relación A/C, sin embargo establece límites máximos para una cantidad determinada de casos. La práctica muestra que es más bien difícil obtener una relación A/C menor a 0,45 y una trabajabilidad normal.

Dosificación mínima de cemento

Una dosificación de cemento suficiente protege la armadura de la corrosión. Esta protección es asegurada por la fuerte alcalinidad que proporcionan los álcalis y el hidróxido de calcio que se

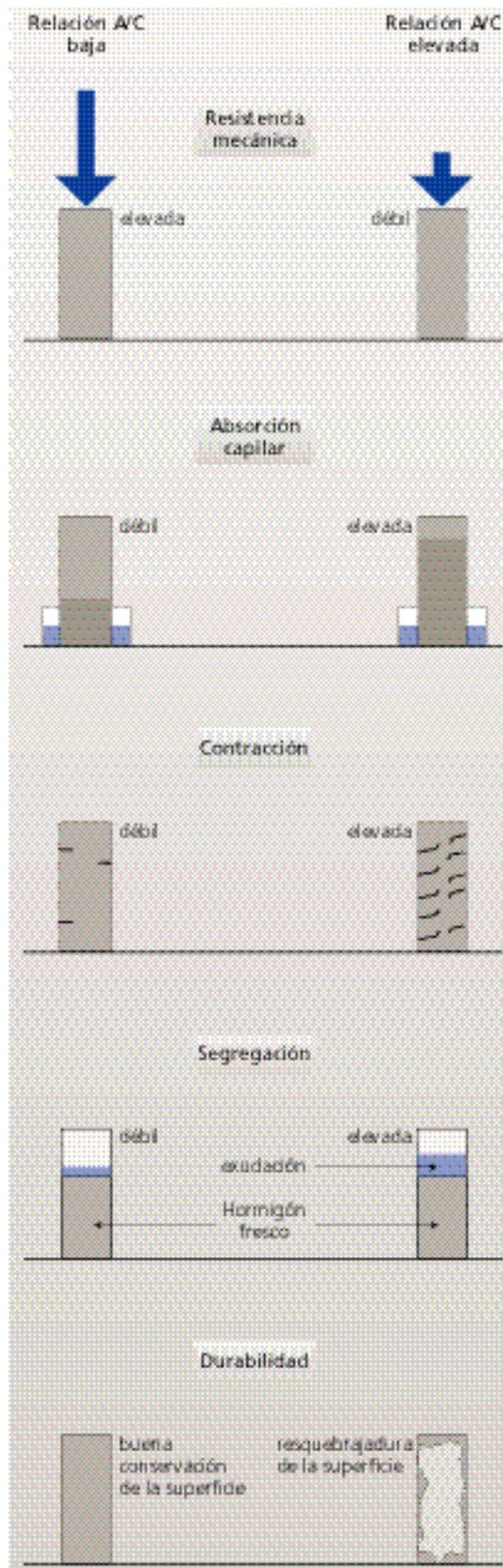


FIG. 2.1.2 Influencia de la relación A/C sobre las características del hormigón.



forma durante la hidratación y también por una reducida porosidad del hormigón. A los fines de que esta protección esté siempre asegurada, el reglamento CIRSOC 201 prescribe que el hormigón contenga como mínimo 280 Kg. de cemento por m³ de hormigón. Esta dosificación puede ser a veces reducida a 200 Kg/m³ para los elementos de hormigón masivo armado que no están expuestos a medios agresivos y cuyos recubrimientos de armaduras igualan o superan los 10 cm.

Para el hormigón a la vista o también cuando se usan agregados triturados, se recomienda aumentar la dosificación de cemento en el orden del 10%.

Porosidad del hormigón

Una mezcla de agregados bien proporcionada, que sigue una curva granulométrica continua, producirá un hormigón de buena trabajabilidad, elevada cohesión y una reducida tendencia a la segregación. Al mismo tiempo ésta será poco porosa y por lo tanto dispondrá de una durabilidad prolongada (figs. 2.1.3 y 2.1.4).

Las mezclas a granulometría discontinua deberían ser utilizadas solamente en casos especiales donde se apunta a ventajas específicas, como por ejemplo un mejor comportamiento al bombeo. Para este tipo de composición es absolutamente necesario que las fracciones granulométricas hayan sido clasificadas con cuidado.

Cálculo volumétrico

El cálculo de la composición ponderado de un

hormigón se basa sobre el volumen absoluto que cada componente ocupa en 1 m³ o también en 1000 l de hormigón puesto en uso. Este volumen se obtiene dividiendo el peso de cada componente por el peso específico:

$$\text{Volumen [l]} = \frac{\text{peso [Kg.]} }{\text{Peso específico [Kg./l]}}$$

Dejando de lado los agregados, el peso de los restantes componentes es conocido por condiciones de resistencia, durabilidad y trabajabilidad:

- El cemento.
- El agua total.
- Los aditivos.

Es necesario además tener en cuenta el volumen ocupado por el aire ocluido (en general 1,0-1,5 %) o por el aire incorporado artificialmente en el interior del hormigón.

El ejemplo siguiente propone un esquema de cálculo para el cómputo del peso de los agregados (8) y la masa volumétrica del hormigón fresco (10) al momento de la preparación de la dosificación.

Ejemplo

Requisitos:

Dosificación del cemento: 325 Kg/m³

Relación A/C: 0,48

Fluidificante: 1,0 % del peso del cemento (aprox. 3 Kg.).

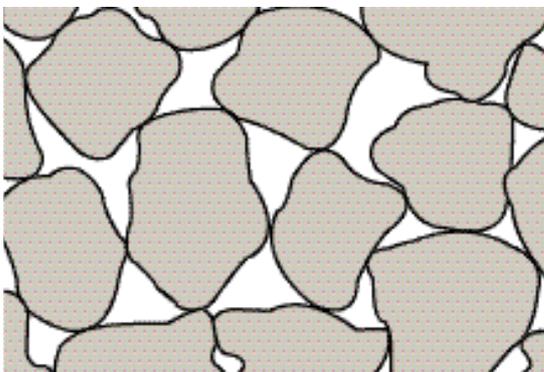


FIG. 2.1.3. Un hormigón monogranular presenta un elevado tenor de vacíos: su porosidad es elevada (representación esquemática).

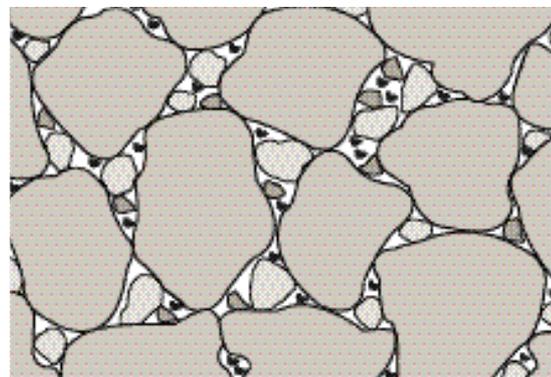


FIG. 2.1.4 Un hormigón con granulometría continua presenta un tenor de vacíos óptimo: su porosidad es reducida (representación esquemática).

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

- ▶ 2.1 Composición del hormigón
- ▶ 2.2 Trabajabilidad y consistencia

Premisa:

Porosidad normal, aire ocluido 1,5 % del volumen del hormigón (= 15 l).

Para obtener la dosificación efectiva a aplicar, se deberá obviamente aumentar cada fracción granular con el peso de la humedad contenida (generalmente 4-6% para la arena y 1-3 % para la piedra). Se deberá además reducir proporcionalmente el agua total con el objetivo de obtener la cantidad de agua de la mezcla (Tabla 2.1.1).

2.2 TRABAJABILIDAD Y CONSISTENCIA

Importancia de la trabajabilidad

Una buena trabajabilidad facilita el transporte y el uso del hormigón, o sea la colocación en los encofrados y la compactación. Además, ésta influye favorablemente en el costo de estas operaciones.

En cuanto al hormigón endurecido, su resistencia y sobre todo su durabilidad, dependen directamente de una buena preparación, de un desencofrado perfecto y de una compactación adecuada, operaciones éstas que pueden llevarse a cabo de modo correcto sólo si la trabajabilidad es adecuada.

Definición de la trabajabilidad y la consistencia

El concepto de trabajabilidad del hormigón no responde a una definición precisa. Este engloba varias propiedades interdependientes como la consistencia, la cohesión (adherencia interna), la tendencia a la homogeneidad, la plasticidad y la tixotropía. Desde el punto de vista científico, la consistencia resulta del frotamiento interno del conjunto de las partículas suspendidas en el agua de amasado, y puede ser estimada prácticamente mediante diversos métodos de examen.

Métodos de examen para la consistencia

En Argentina, se utilizan corrientemente dos métodos de examen para la valoración de la consistencia del hormigón: el método de asentamiento en el cono de Abrams y el método de extendido en la mesa de Graff.

Estos dos métodos (Figs. 2.2.1 y 2.2.2) no son recomendables de la misma manera en los diversos campos de consistencia.

La tabla 2.2.1 indica los métodos más apropiados para cada sector de consistencia como también los valores característicos.

Control de la trabajabilidad en el inicio del hormigonado.

Valores de consistencia similares para hormigones provenientes de hormigoneras distintas, no garantizan una trabajabilidad rigurosamente

Cálculo por 1m ³	1.000 litros		
Constituyente	Peso(Kg.)	Peso específico (Kg./l)	Volumen (l)
Cemento	325	3,15	325/3,15=103 (1)
Agua total 1)	156	1,00	156 (2)
Fluidificante	3	1,00 aprox.	3 (3)
Aire ocluido	--	--	15 (4)
Subtotal	484	(6)	277 (5)
Agregados secos	723x2,70= 1.952 (8)	2,70	1.000-277= 723 (7)
Hormigón fresco	484+1.952= 2.436 (9)	Masa volumétrica 2,436 (10)	277+723= 1.000

Tabla 2.1.1

1) Agua total = agua de la mezcla + agua (o humedad) de los agregados (1)-(10): orden de cálculo.



FIG. 2.2.1.
Método de la
mesa de Graff.



FIG. 2.2.2
Asentamiento en
el cono de
Abrams

idéntica. Los resultados pueden ser influenciados por la elección de los constituyentes como también por el método de elaboración. Se recomienda entonces verificar al comienzo la trabajabilidad del hormigón y corregir la consistencia en caso de ser necesario.

En el caso de un cambio en la fuente de provisiónamiento de los agregados o en la curva granulométrica de los mismos, será necesario controlar los valores de consistencia prescritos para el trabajo en curso.

Los fluidificantes mejoran la consistencia

Gracias a los fluidificantes, en particular a los superfluidificantes, es posible confeccionar hormigones con relaciones A/C= 0,5 o menores y con consistencias plástica - blanda - fluida.

El mejoramiento de la consistencia no debería nunca ser realizado mediante el posterior agregado de agua.

Influencia de otras características del hormigón sobre su consistencia.

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 además sobre la resistencia (y otras características más) del hormigón, a menudo en sentido opuesto.

La tabla 2.2.2 muestra los efectos sobre la consistencia y la resistencia al variar determinados parámetros de base del hormigón.

La trabajabilidad disminuye con el tiempo

Es inevitable que la mezcla se vaya rigidizando luego de terminada la fase de mezclado, hecho éste que se traduce en un empeoramiento de la trabajabilidad (Fig. 2.2.3). Nótese al respecto que el valor nominal utilizado puede referirse al de fi-

Campos de consistencia	Extendido E= ϕ (mm)	Asentamiento A = s (mm)
Rígida	Inapropiada	Inapropiado
Plástica	300-400	10-70
Blanda	410-500	80-150
Fluida	> ϕ = 510	> ϕ = 160

TABLA 2.2.1. Campos de consistencia y métodos de examen.

La tabla es conceptual, por valores normalizados remitirse a la norma IRAM 1666 y reglamento CIRSOC 201.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.2 Trabajabilidad y consistencia

▶ 2.3 Elaboración y transporte

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

TABLA 2.2.2 Efecto de la variación de diversos parámetros sobre la consistencia y la resistencia del hormigón.

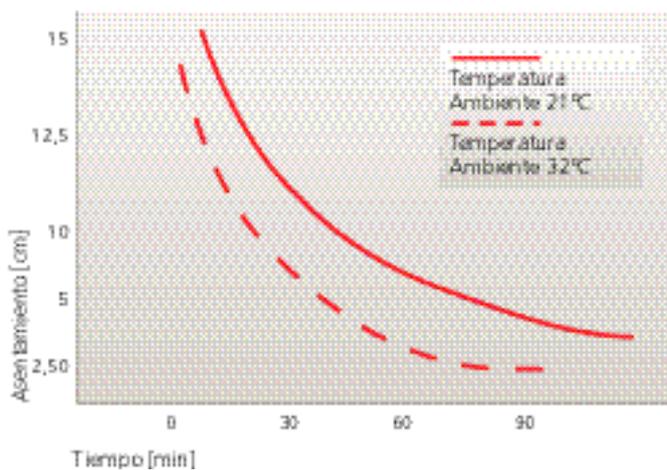


FIG. 2.2.3 Relación entre el tiempo que transcurre luego de terminado el mezclado y la consistencia.

nalización del mezclado o también al momento de abastecimiento en obra. Este efecto se nota sobre todo en presencia de condiciones atmosféricas particularmente calurosas, como así también operando con cemento de fraguado rápido.

2.3. ELABORACION Y TRANSPORTE

Dosificación de los componentes

La correcta elaboración de un hormigón para una determinada composición, depende en gran medida del equipamiento del cual se dispone en la obra. Los dispositivos de dosificación y pesaje deben garantizar la determinación exacta de las

proporciones requeridas de los componentes: cemento, agregados, agua de amasado y aditivos. A veces estas operaciones son efectuadas con sistemas poco adecuados como son los de dosificación volumétrica.

El orden con el cual los componentes son introducidos en la hormigonera, reviste gran importancia y debe ser objeto de exámenes preliminares. Este influye sobre todo en:

- la buena dispersión de los componentes;
- la eficacia del mezclado;
- el efecto óptimo de los aditivos;
- el rendimiento de la instalación;
- el desgaste.

Mezclado de los componentes

La función de la hormigonera es la de combinar cada uno de los componentes en una mezcla perfectamente homogénea garantizando lo siguiente:

- intensidad de mezclado elevada;
- dispersión rápida de los componentes;
- recubrimiento óptimo de los agregados por medio de la pasta de cemento;
- llenado y vaciado rápido;
- desgaste mínimo.

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

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.3 Elaboración y transporte

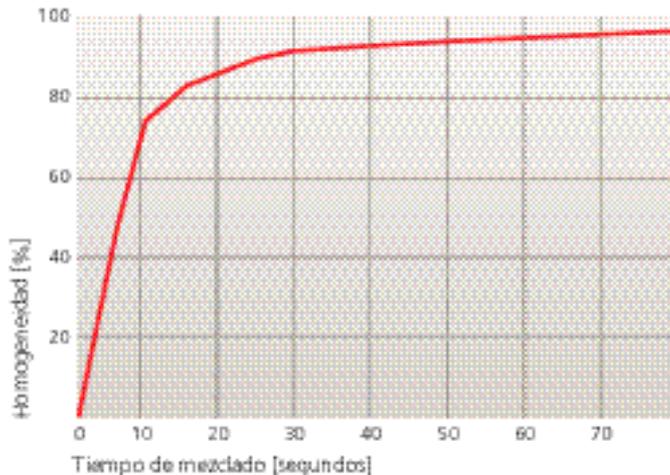


FIG. 2.3.1. Relación entre el tiempo de mezclado y el grado de homogeneidad de una mezcla.

Tiempo de mezclado

Definición:

Tiempo de mezclado = duración del mezclado a partir del momento en el cual el agua hace contacto con el cemento en la hormigonera.

El tiempo de mezclado varía según el tipo de equipo utilizado y debe ser determinado mediante exámenes preliminares apropiados.

Si se necesita agregar agua, se debe prolongar en consecuencia el tiempo de mezclado.

Considerando el grado de homogeneidad de la masa en función al tiempo de mezclado, se constata que la homogeneidad crece muy rápidamente al comienzo para luego acercarse asintóticamente al valor máximo teórico de

100% (fig 2.3.1 y 2.3.2).

La experiencia práctica y un gran número de exámenes han mostrado que además de la homogeneidad, otros factores asumen un rol importante para la calidad del hormigón. Así por ejemplo, un mezclado enérgico favorece la dispersión del cemento (Fig. 2.3.3).

La norma IRAM 1666 parte II, establece los tiempos de mezclado para distintas condiciones de elaboración.

Transporte del hormigón

El hormigón elaborado debe ser transportado lo más velozmente posible desde la hormigonera a la obra. Obviamente debe ser usado rápidamente para poder conservar su calidad.

La calidad del camino influye fuertemente en la segregación de la mezcla, en relación a esto, sólo las motohormigoneras están en condiciones de garantizar un transporte adecuado de un hormigón con consistencia plástica – blanda.

Al llegar a la obra, el responsable de los trabajos debe controlar el parte de entrega y la calidad al menos de las primeras cargas. Si el hormigón es transportado por motohormigonera, es necesario que éste sea mezclado al momento del arribo por 1-2 minutos antes de ser descargado, sobre todo cuando se trata de hormigones con aditivo incorporador de aire.

El agregado de agua suplementaria debe ser evitado en la medida de lo posible, dado que ésta

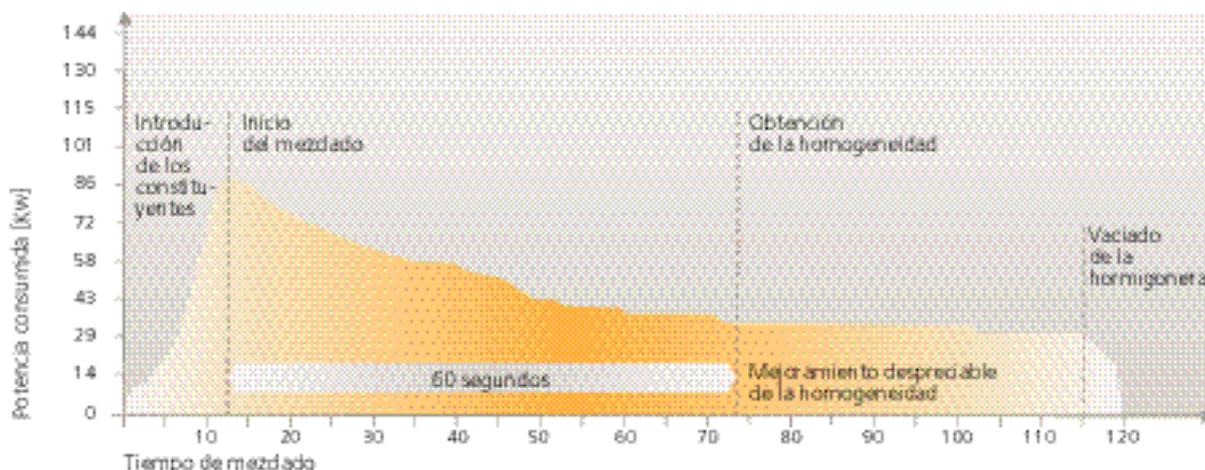


FIG. 2.3.2 Diagrama típico de la potencia de corriente eléctrica consumida por la hormigonera durante el mezclado.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.3 Elaboración y transporte

▶ 2.4 Uso y compactación

última está fuera de control y no se distribuye en modo óptimo. De todos modos, si el responsable de los trabajos considera absolutamente necesario un agregado, este hecho deberá ser mencionado en el remito de entrega. El agregado de agua no se debe realizar bajo ningún punto de vista en vehículos no aptos para el mezclado.

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.).

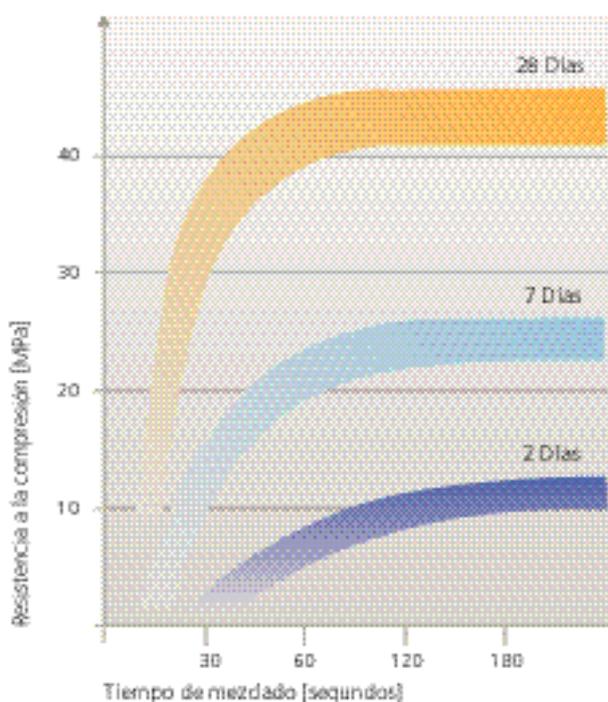


FIG. 2.3.3 Influencia del tiempo de mezclado sobre el aumento de la resistencia del hormigón.

2.4 COLOCACION Y COMPACTACION

Transporte y colocación

La tabla 2.4.1 indica los principales sistemas de transporte del hormigón en función de su consistencia y de las particularidades de las obras.

El volumen suministrado y los sistemas de transporte del hormigón deben ser armónicos entre ellos. La colocación del hormigón se debe realizar a un ritmo constante en estratos horizontales de

espesor lo más regulares posibles. Para evitar la segregación, la altura de la caída no debería superar los 50 cm. Si la distancia a la superficie supera los 2 m, el hormigón debería ser colocado con el auxilio de tubos o de flexibles.

Compactación

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.

Métodos de compactación

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

El método más utilizado y también el más eficaz consiste en tratar el hormigón con vibradores internos (vibradores a aguja) o también vibradores externos (vibradores para el encofrado). Muchas veces se recurre también a la combinación de estos métodos.

La vibración hace que los granos de los agregados se acerquen entre sí, el aire suba a la superficie y los vacíos se rellenen con la pasta de cemento. 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.

Campos de aplicación de los vibradores a aguja a alta frecuencia

(tabla 2.4.2)

La experiencia muestra que la frecuencia de 12.000 vibraciones por minuto es la más adecuada para los hormigones convencionales. Para hormigones de granulometría fina es necesario aumentar la frecuencia hasta las 18.000 vibraciones por minuto.

Las reglas de compactación

- 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



Colocación mediante	Consistencia del hormigón		
	Rígida	Plástica	Fluida
Cinta transportadora		■	
Grúa		■	
Tubo vertical		■	
Bomba		■	
Plano inclinado (largo máx.3 m)		■	
Canal inclinado			■

TABLA 2.4.1 Sistemas de transporte del hormigón en función a su consistencia.

Diámetro de la aguja (mm)	Diámetro del campo de acción (cm)	Distancia entre los puntos de inmersión (cm)
< 40	30	25
40-60	50	40
> 60	80	70

TABLA 2.4.2 Campo de acción y distancia entre puntos de aplicación del vibrador.

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.

- No es correcto distribuir el hormigón utilizando el vibrador a aguja.
- 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.
- Si se coloca hormigón " fresco sobre fresco", el vibrador a aguja debe penetrar a una profundidad de 10-15 cm en el estrato inferior para poder asegurar la continuidad y homogeneidad entre los distintos estratos (Fig. 2.4.1).

Regla práctica:

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

Revibrado

Introduciendo el vibrador en la masa de hormigón precompactada (antes del inicio del fraguado), se puede mejorar ulteriormente la compactación. Esta técnica es ideal sobre todo para los hormigones con valores elevados de A/C, con reducida retención de agua o también para aquellos en los cuales la colocación ha sido difícil. De esta manera se pueden colmar los vacíos producidos por el asentamiento del hormigón fresco alrededor de la armadura horizontal. La condición necesaria para lograr un buen revibrado es que éste sea llevado a cabo en el momento justo, cuando el hormigón está todavía trabajable. El revibrado es la tarea más difícil y debería ser llevada a cabo por personal especializado.

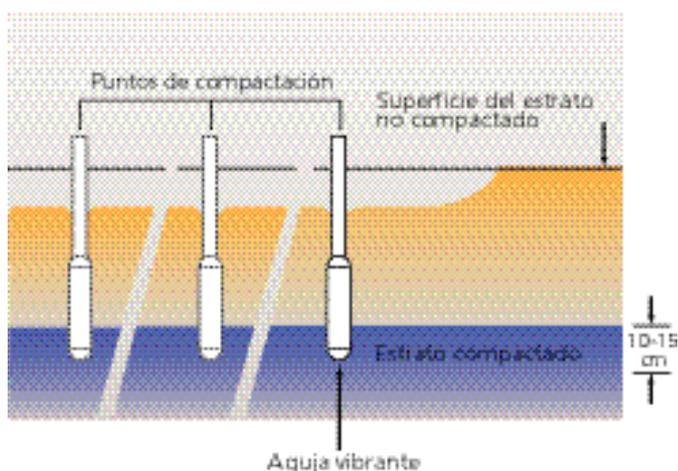


FIG. 2.4.1: Uso en estratos y distancia entre los puntos de compactación.

2.5 CURADO

Objetivo del curado

Se entiende por curado el conjunto de medidas que tienen la función de proteger el hormigón, desde el momento de la colocación hasta el desarrollo de resistencias suficientes, mejorando así la calidad.

Uno de los mayores peligros para el hormigón fresco es la deshidratación precoz: ésta se inicia en superficie y se propaga en profundidad impidiendo una buena hidratación de la pasta de cemento. Esta, debe poseer una densidad elevada y de este modo una porosidad mínima, sobre todo en las zonas directamente bajo la superficie. Sólo así, la pasta de cemento está en condiciones de oponer resistencia a las agresiones externas y a la carbonatación antes que alcancen la armadura.

El curado debe proteger al hormigón de:

- Deshidratación precoz debida al viento, al sol, al frío seco.
- Temperaturas extremas (calor – frío y grandes amplitudes térmicas).
- Intemperie.
- Acción prematura de sustancias nocivas como aceites, y otras.

Deshidratación precoz

Es muy importante que las medidas de protección contra la deshidratación precoz sean fijadas desde la colocación del hormigón, dado que la pérdida prematura de agua en superficie es muy grave.

Posible efectos no deseados:

- Aparición de importantes fisuras de contracción plástica (ver cap. 3.2., “Formación de fisuras”).
- Pérdida de resistencia.
- Tendencia al desarenado de la superficie.
- Reducción de la impermeabilidad y de la durabilidad.
- Disminución de la resistencia al desgaste.

Medidas de protección contra la deshidratación precoz del hormigón:

- Retardar el desencofrado.
- Cubrir con láminas plásticas (Fig. 2.5.1).
- Cubrir con paños aislantes (Fig. 2.5.2).
- Cubrir con un estrato protector de manera de mantener la humedad (yute, paños geotextiles).
- Rociar con un agente protector líquido (compuestos formadores de membrana, Fig. 2.5.3).
- Regar continuamente con agua.
- Conservar los elementos de hormigón bajo agua.
- Combinar más métodos protectores.



FIG. 2.5.1 Cobertura de un techo de hormigón con una lámina de plástico.



FIG. 2.5.2 Protección aislante de una pilastra.



FIG. 2.5.3 Regado de un compuesto formador de membrana sobre una calle de hormigón.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

- ▶ 2.5 Curado
- ▶ 2.6 Encofrado



Velocidad de deshidratación (Evaporación)

La velocidad de deshidratación depende de los siguientes factores:

- Temperatura del aire.
- Temperatura del hormigón.
- Humedad relativa del aire.
- Velocidad del viento.

Las figs. 2.5.4 y 2.5.5 ilustran la acción de estos factores.

Diferencias extremas de temperatura

El hormigón se dilata con el calor y se contrae con el frío. Si estas deformaciones son impedidas o también si el salto térmico es grande, pueden formarse tensiones internas. En el caso en que las tensiones internas del hormigón fresco son más grandes que la resistencia a la tracción, se formarán fisuras. Por esta razón es necesario evitar someter al hormigón aún sin endurecer a considerables amplitudes térmicas entre el núcleo y la superficie.

La tabla 2.5.1 muestra una selección de medidas de protección capaces de defender al hormigón de los saltos de temperatura (véase sobre este tema también el capítulo 3.2 sobre la formación de fisuras).

Medidas para el curado

El método aplicado (tabla 2.5.1) y la duración del curado dependen esencialmente del ambiente circundante y del tipo de hormigón.

Intemperie

Las distintas condiciones del medio ambiente pueden alterar las propiedades del hormigón fresco, lo cual también modificará las propiedades del hormigón endurecido.

2.6. ENCOFRADO

El encofrado contribuye en buena parte al éxito de una construcción. Éste condiciona ya sea el aspecto como el color de la superficie y otorga al hormigón su dimensión arquitectónica. No obstante esto, muchas veces sucede que no se le dedica la debida atención.

Elección del encofrado

El constructor se ocupa generalmente de la elección del encofrado basándose en los siguientes criterios:

- Tipo de obra o de elemento constructivo.
- Requisitos de calidad de la superficie de hormigón.
- Número de posibles reutilizaciones del encofrado.
- Dificultad de montaje.
- Capacidad de aislamiento térmico.
- Precio.

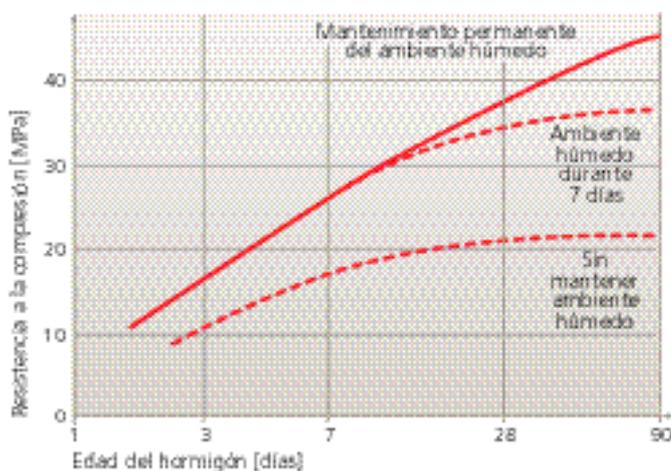


FIG. 2.5.4 Efecto del mantenimiento de un ambiente húmedo sobre el desarrollo de las resistencias del hormigón.

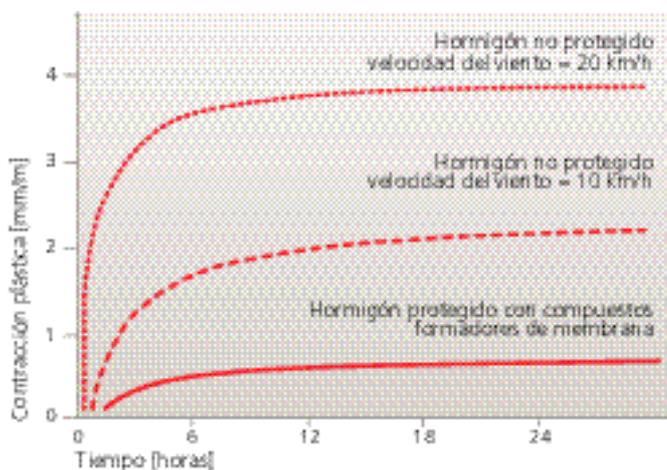


FIG. 2.5.5 Contracción del hormigón fresco (protegido y no) como consecuencia de condiciones meteorológicas adversas.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.6 Encofrado

Medidas	Temperatura externa en °C				
	Inf. a -3	-3 a +5	+5 a +10	+10 a +25	Sup. a + 25
Cubrir las superficies expuestas, aplicar una membrana de curado o mantener la humedad mediante regado continuo. Superficies encofradas: mantener la humedad del encofrado de madera, proteger los encofrados metálicos contra la insolación directa.				●	●
Cubrir las superficies expuestas o aplicar una membrana de curado.			●	●	
Cubrir las superficies expuestas, aplicar una membrana de curado. Protección térmica necesaria. Superficies encofradas: aplicar una protección térmica.		●			
Aislar las superficies expuestas y calentar o aplicar una protección térmica. La temperatura del hormigón debe ser mantenida por encima de los + 10 °C al menos por 3 días.	●				

TABLA 2.5.1 Medida para el curado en función de la temperatura externa.

Materiales para el encofrado

- Tablas de madera común, no cepillada.
- Paneles de madera tratada.
- Paneles estratificados.
- Encofrados plastificados (poliéster, poliestireno, linóleum, elastómero, etc.).
- Encofrados metálicos.

Requisitos para el encofrado

- Dimensiones precisas.
- Estanqueidad (Fig. 2.6.1)
- Rigidez, ausencia de deformaciones.
- Limpieza.
- Adherencia reducida al hormigón endurecido (Figs. 2.6.2 y 2.6.3).
- Estética de la estructura de superficie (Fig. 2.6.4).

Tipos de encofrado

En línea general se puede sostener que cuanto más intenso es el carácter absorbente del encofrado, más lisa y compacta resultará la superficie del hormigón, dado que los encofrados están en condiciones de absorber el agua y las burbujas de aire excedentes del hormigón fresco apenas puesto en uso.

Para las superficies a la vista se debería utilizar siempre la misma serie de paneles de madera, dado que el poder absorbente de la madera disminuye luego de cada uso, confiriendo al hormigón una particular sombra cromática. Las tablas comunes deberían ser saturadas con pasta de cemento antes de su primer uso. De esta forma se podría uniformar en parte las desigualdades de la madera como también eliminar parcialmente los azúcares contenidos que perturban el fraguado y la hidratación del cemento (Fig. 2.6.5).



FIG. 2.6.1 Efecto de la falta de estanqueidad en el encofrado.



FIG. 2.6.3 Fragmentos de superficie de hormigón adheridos al encofrado.



FIG. 2.6.2 Daños en el recubrimiento del hormigón.



FIG. 2.6.4 Ejemplo de superficie texturada de hormigón bien lograda.

Los encofrados no absorbentes (hidrorrepelentes) favorecen el enriquecimiento localizado de las partículas finas (microsegregaciones) y el aumento de la relación A/C. Esto deriva en irregularidades cromáticas en la superficie ("nubes"). Si las segregaciones asumen un carácter más importante, pueden producirse sensibles pérdidas de durabilidad (ver capítulo 3.1, "Segregación del hormigón"). Para los elementos a la vista es entonces mejor utilizar encofrados absorbentes o munidos de un estrato de drenaje (por ejemplo fibras polipropilénicas).

Productos de desencofrado

Los productos de desencofrado son empleados para despegar sin dificultad los encofrados de la superficie del hormigón, conservando ambos intactos.

Estos deben ser aplicados con cuidado en estratos finos y regulares antes de la ubicación de la armadura. El exceso puede ser eliminado eficazmente con paños absorbentes (fig. 2.6.6).

La aparición de manchas o de variados colores grises sobre la superficie del hormigón se debe a menudo a la aplicación incorrecta de los productos de desencofrado.



FIG. 2.6.5 Superficie inferior de un techo de estacionamiento: las diferencias cromáticas se deben a los diversos grados de absorción de los encofrados utilizados.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.6 Encofrado

▶ 2.7 Hormigonado a temperaturas elevadas

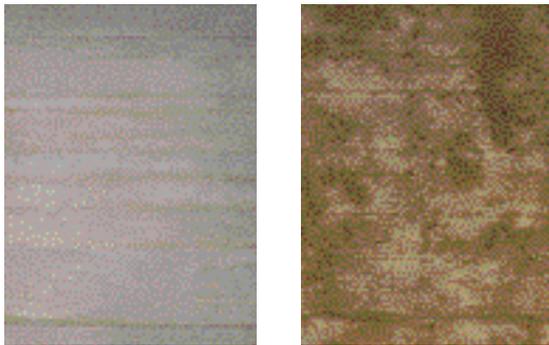


FIG. 2.6.6 Efectos de un producto de desencofrar:

- A izquierda: bien distribuido, exceso retirado mediante paño absorbente.

- A derecha: dosis excesiva.

2.7 HORMIGONADO A TEMPERATURAS ELEVADAS

Durante los meses de verano a menudo se constata el descenso de las resistencias medias a 28 días en algunos MPa. En este caso "se habla de agujero estival" (Fig. 2.7.1).

Se trata de un fenómeno conocido, típico de todas las regiones donde se verifica una diferencia importante entre las temperaturas estacionales. Las causas principales son tres:

- En general vale el principio que cuanto más elevada es la temperatura del hormigón, tanto más acelerado es el proceso de hidratación (los cristales con forma de aguja se desarrollan más rápidamente). Como resultado se observa un au-

mento de las resistencias iniciales. Sin embargo los cristales con forma de aguja son diferentes a aquellos que se desarrollan a temperaturas más bajas y tienen una menor tendencia a entrelazarse, lo que resulta en una porosidad más elevada. Dado que la resistencia final del hormigón depende de la compactación de los cristales y de la porosidad, es razonable que se verifiquen resistencias menores a largo plazo.

- A pesar que se recomienda no agregar agua al hormigón en la obra, esta operación puede evitar un endurecimiento precoz debido a la elevada temperatura ambiental. Dado que como consecuencia del agregado de agua aumenta la relación A/C, se da inevitablemente una pérdida de resistencia y más aun una pérdida de durabilidad.

Regla práctica

El agregado de 10 litros de agua por m³ de hormigón provoca una pérdida del orden de un 10% en la resistencia a 28 días.

- En casos particulares, cuando existe una gran diferencia de temperatura entre los constituyentes del hormigón y el agua de mezcla proveniente de la red de distribución (fría también en verano), se puede observar una distribución irregular del ligante en la mezcla, lo que puede ocasionar pequeñas pérdidas de resistencia.

Con el fin de mantener las pérdidas de resisten-

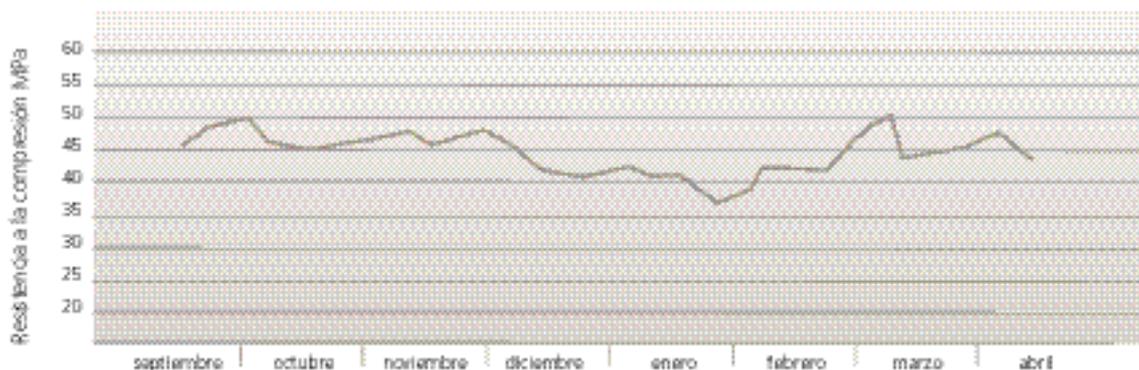


FIG. 2.7.1 Relevamiento típico de la resistencia a la compresión y de la trabajabilidad. Se nota muy bien el "agujero estival". Los datos provienen de los documentos de control de calidad de una central de hormigón elaborado.



cia debidas a la elevada temperatura ambiental dentro de un límite aceptable, la norma IRAM 1666 parte I, "Hormigón de cemento Portland – Hormigón Elaborado", prevé una temperatura máxima de 30°C para el hormigón fresco a colocar. Para hormigones con características particulares esta temperatura no debería superar los 25°C.

Además de la pérdida de resistencia y de durabilidad (Fig. 2.7.2), la elevada temperatura del hormigón puede ser la causa de ulteriores efectos no deseados:

- La hidratación acelerada del cemento se manifiesta a través de la disminución de la trabajabilidad inicial, que puede llevar hasta el endurecimiento y a la imposibilidad de colocar el hormigón (ver también capítulo 2.2).
- El hormigón se seca más rápido en la superficie. Este fenómeno se agrava en presencia de viento, por insolación directa y por humedad ambiental reducida. El curado del hormigón (ver cap. 2.5) contribuye a disminuir la pérdida de agua mediante el humedecimiento continuo, lo que contribuye a evitar shocks térmicos en superficie. Sin la aplicación de estas medidas, la hidratación del cemento será incompleta y los elementos de construcción (de modo especial las superficies) no dispondrán de la resistencia final deseada ni tampoco de la durabilidad proyectada.

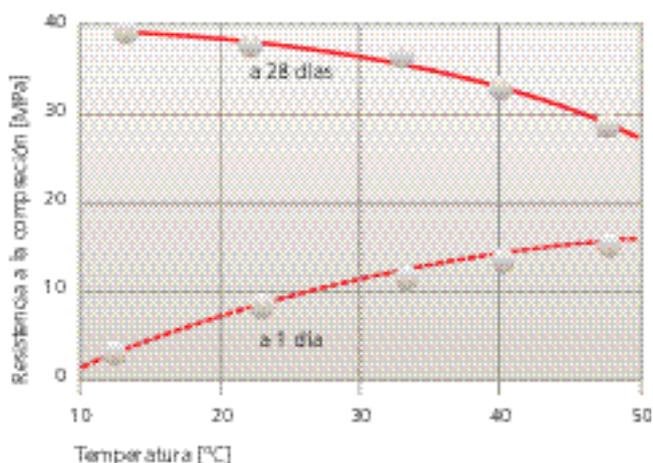


FIG. 2.7.2 Influencia de la temperatura sobre el desarrollo de las resistencias del hormigón.

Medidas para el control de la temperatura del hormigón

La temperatura "t" de un hormigón convencional fresco puede ser estimada mediante la siguiente fórmula simplificada:

$$t_{\text{hormigón}} = 0,7 \times t_{\text{agregados}} + 0,2 \times t_{\text{agua}} + 0,1 \times t_{\text{cemento}}$$

En la fórmula se ve que la temperatura del cemento tiene una influencia mínima sobre la temperatura del hormigón. Además, el cemento raramente supera los 60°C a la salida de las instalaciones de molienda.

Medidas para la reducción de la temperatura del hormigón

- Equipar los silos para la piedra con un aislante térmico.
- Enfriar la piedra gruesa con agua.¹⁾
- Enfriar el agua de la mezcla con adición de hielo.¹⁾
- En determinados casos y con el control de especialistas, se puede también enfriar el hormigón por medio de nitrógeno líquido.

¹⁾ La cantidad de agua de mezcla debe ser reducida en la proporción que corresponda.

El hormigonado a temperaturas elevadas exige una buena programación, como así también una preparación minuciosa

- Coordinación meticulosa del suministro con la colocación del hormigón para evitar todo tipo de demoras.
- Prever los instrumentos y el personal suficientes para el hormigonado de manera de poder llevar a cabo la colocación y la compactación sin interrupciones.
- El contrapiso y el encofrado no deben absorber el agua del hormigón fresco, por lo que es necesario mojar la estructura del encofrado antes del hormigonado (Fig. 2.7.3). No obstante, debe evitarse el mojar excesivamente la estructura del encofrado que podría formar charcos de agua residual.
- Si las condiciones para un hormigonado correcto a temperatura elevada no están dadas, independientemente de las razones, es necesario postergar la operación hasta que la temperatura haya bajado.

▼ 2. Del hormigón fresco al hormigón endurecido

▶ 2.7 Hormigonado a temperaturas elevadas

▶ 2.8 Hormigonado a bajas temperaturas



FIG. 2.7.3 Humectación del encofrado.



FIG. 2.7.4 Vaporización de un producto para formación de membrana de curado inmediatamente después de la terminación superficial.

- Dentro de ciertos límites, el uso de retardadores para el fraguado permite paliar los inconvenientes derivados de una hidratación muy veloz del cemento. Los retardadores tienen muy poca influencia sobre el endurecimiento precoz del hormigón y exigen un curado prolongado. La dosificación adecuada del aditivo retardante deberá ser determinada únicamente por medio de exámenes preliminares que comprueben su eficacia.

Colocación y compactación

- Son esenciales tiempos de espera mínimos y una colocación rápida.
- El personal que trabaja en las obras debe estar informado en relación con las particularidades y las exigencias del hormigonado a temperaturas elevadas.

- En caso de esperas imprevistas, es necesario que el hormigón que se encuentra en el camión sea protegido del viento y del sol. La motohormigonera puede ser enfriada desde el exterior con agua.

- El agregado de agua en la obra está absolutamente prohibido. Frente a casos excepcionales de agregado de agua en la motohormigonera deberán valorarse los efectos nocivos de la adición de agua y asegurar un mezclado vigoroso.

Este agregado debe figurar siempre en el remito de entrega.

Curado del hormigón: las horas siguientes a la colocación son determinantes

- El curado inmediato y prolongado cuanto tiempo sea necesario, evita la deshidratación del hormigón, reduce el riesgo de formación de fisuras y aumenta la impermeabilidad como también la resistencia a la compresión.

- El curado debe iniciarse inmediatamente después de la colocación del hormigón (Fig. 2.7.4).

2.8. HORMIGONADO A BAJAS TEMPERATURAS

Riesgos ligados a las bajas temperaturas

Cuando hace frío, es necesario tomar medidas indispensables para la elaboración y la colocación del hormigón.

La norma IRAM 1666 y el Reglamento CIRSOC 201 hacen referencia a requisitos y medidas especiales para la colocación del hormigón si la temperatura ambiente está por debajo de +5°C.

Ni bien la temperatura del hormigón desciende por debajo del límite de los 0°C, el desarrollo de las resistencias es casi nulo. Si el agua contenida en el hormigón joven se congela, ésta puede causar deformación o lo que es más, la disgregación y la rotura de la matriz.

Si la temperatura externa está por debajo de -3°C, es necesario tomar las medidas adecuadas a los fines de que la temperatura del hormigón sea al menos de +10°C.



Se considera en general que el hormigón está en condiciones de resistir al hielo ni bien su resistencia a la compresión supera los 5 MPa. El reglamento CIRSOC 201 establece éste umbral en 7 MPa y exige además la protección del hormigón contra el hielo hasta que se haya alcanzado la resistencia mencionada.

La figura 2.8.1 permite evaluar el tiempo necesario para que un hormigón alcance la resistencia al hielo en función de la relación A/C, teniendo en cuenta la temperatura del hormigón como también el tipo de cemento utilizado.

Medidas para la elaboración del hormigón a bajas temperaturas

Las siguientes medidas mejoran el desarrollo de las resistencias y la evolución de la temperatura del hormigón durante la elaboración, en presencia de bajas temperaturas ambiente:

- Elevar la temperatura del hormigón precalentando el agua de la mezcla y/o los agregados.
- Aumentar la dosificación del cemento sin modificar los otros componentes de la mezcla. De esta manera aumentará también la resistencia inicial.
- Bajar la relación A/C incorporando un superfluidificante (SF); cuanto menos agua contenga el

hormigón menos sensible será al hielo.

- Acelerar el desarrollo de las resistencias mediante la introducción de un aditivo acelerante de fraguado y endurecimiento.

Medidas a adoptar en la obra en tiempo frío

El hormigonado a baja temperatura ambiente impone determinadas precauciones a adoptar en la obra:

- No proceder al hormigonado sobre un suelo helado ni tampoco sobre un hormigón helado.
- El hormigón precalentado debe ser rápidamente colocado en encofrados libres de hielo y nieve, e inmediatamente compactado.
- Se aconseja medir la evolución de la temperatura interna del hormigón (Fig. 2.8.2).
- Apenas colocado el hormigón, debe ser especialmente protegido para evitar la pérdida de calor. De este modo se recupera además el calor producido por la hidratación del cemento. Se recomienda la protección con paños aislantes o láminas térmicas (Fig. 2.8.3).
- Si los estratos aislantes no pueden ser aplicados directamente sobre la superficie del hormigón, se debe prever una protección contra las corrientes de aire.
- Se debe proteger el hormigón de la pérdida de calor y de la deshidratación durante todo el período de endurecimiento (con el frío, la humedad relativa del aire es generalmente muy baja y favorece la evaporación del agua contenida en el hormigón).
- Si, durante el endurecimiento, la temperatura del hormigón desciende por debajo del punto de congelamiento, se deberá prolongar el tiempo de desencofrado tanto como haya durado el hielo.

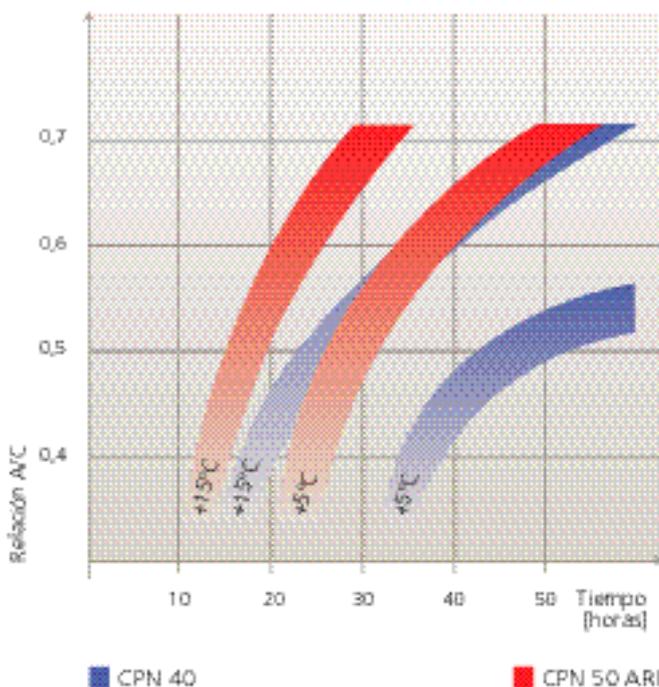


FIG. 2.8.1 Tiempo necesario para alcanzar la resistencia al hielo (5 MPa) en función de la relación A/C para diversos tipos de cemento y temperaturas del hormigón.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.1 Segregación



FIG. 2.8.2 Determinación de la temperatura del hormigón.



FIG. 2.8.3 Láminas aislantes que protegen las paredes apenas puesto en uso, ya sea de la deshidratación como de la pérdida muy rápida de calor.

3.1 SEGREGACION

Las diversas formas de segregación

La segregación es la separación de los componentes del hormigón fresco. Esta se puede manifestar cada vez que el hormigón es transportado o bien cuando está en movimiento (traslado, colocación, compactación).

La segregación tiene siempre importantes consecuencias sobre el aspecto del hormigón y más aun sobre su calidad. Esta puede resultar de la separación entre:

- Las diversas fracciones granulares.
- Los agregados y la pasta de cemento.
- Los agregados finos y el agua de amasado.

Entre las formas más corrientes de segregación se citan:

- “Nidos de abeja”: concentraciones locales de agregados gruesos (Fig. 3.1.1).
- “Exudación”: Acumulamiento de un exceso de agua sobre las superficies más o menos horizontales del hormigón, resultando superficies irregulares, harinosas o porosas.
- “Exudación vertical”: agua segregada o excedente que sube a lo largo de las superficies verticales durante la compactación (Fig. 3.1.2).
- Microsegregaciones (cemento/agregados finos): a menudo parecen más preocupantes de lo que en realidad son para la calidad del hormigón (Fig. 3.1.3).

Las causas

Las principales causas de los diversos tipos de segregación son las siguientes:

- Consistencia demasiado fluida del hormigón fresco.
- Dosificación excesiva de superfluidificante.
- Colocación incorrecta (vibración excesiva, falta de flexibles para compensar la altura de caída, hormigón vertido contra el encofrado vertical).
- Composición inadecuada del hormigón (elección inapropiada de las fracciones granulares, dosificación insuficiente de cemento).
- Tamaño máximo con diámetro demasiado grande con respecto a las dimensiones del elemento puesto en uso.
- Tiempo de mezclado demasiado corto.
- Impermeabilidad insuficiente de las juntas de encofrado, pérdida de lechada de cemento (efecto filtrante).
- Armadura muy densa (efecto tamiz).
- Recubrimiento insuficiente de la armadura.



FIG. 3.1.1 Nidos de abeja formados como consecuencia de una altura de caída excesiva, o también por una armadura muy densa.

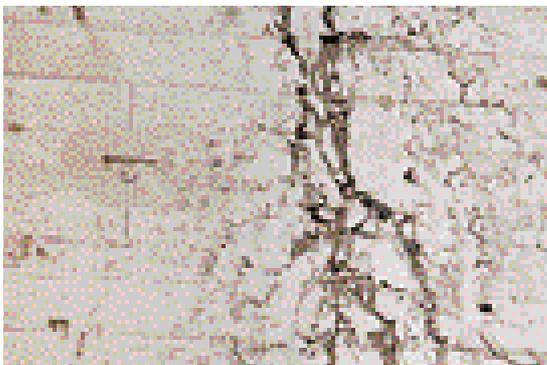


FIG. 3.1.2 Exudación vertical a lo largo de una superficie encofrada.



FIG. 3.1.3 Superficie poco estética resultante de la microsegregación entre los agregados finos y la pasta de cemento.

3.2 FISURACION

Fisuras capilares

Las fisuras con una abertura inferior a 0,3 mm son denominadas fisuras capilares. Estas son apenas visibles y están presentes prácticamente sobre todos los elementos de dimensiones medianas y grandes.

Una gran cantidad de estudios han demostrado que la presencia de fisuras capilares no compromete la durabilidad, la idoneidad de empleo, ni tampoco la capacidad portante de los elementos en cuestión. El cálculo estático del hormigón elaborado prevé y tiene en cuenta la presencia de estas fisuras. Con el tiempo, las fisuras capilares pueden llegar a cicatrizar gracias a la hidratación del cemento que se prolonga por años.

Sin embargo es necesario mencionar el hecho que la apertura máxima de las fisuras capilares en un hormigón impermeable no puede superar 0,1 mm.

Fisuras derivadas de la contracción plástica

Las fisuras derivadas de la contracción plástica (así llamadas porque se manifiestan antes del final del fraguado) se forman como consecuencia de la deshidratación precoz, luego de la colocación del hormigón. La pérdida de agua puede ser consecuencia de la evaporación excesiva, como también de una intensa absorción por parte del encofrado y del contrapiso. Como resultado se observa una notable contracción en los estratos en los cuales la pérdida es grande, sin que el resto del hormigón sea particularmente afectado, como se observa en la figura 3.2.1. A esta altura se desarrollan tensiones internas entre los estratos sometidos a la contracción. Si las tensiones son superiores a la resistencia a la tracción (reducida en la fase inicial), se pueden formar fisuras de hasta 1 mm de abertura. Los elementos horizontales (como los pisos) son los más amenazados por la contracción plástica (Fig. 3.2.2).

Dejando de lado el factor estético, estas fisuras pueden ser el origen de la disgregación del hormigón (el hielo que se forma en las fisuras acelera el proceso de disgregación).

Consecuencias de la deshidratación precoz

La pérdida de agua puede impedir la buena hidratación del cemento causando una disminución en las resistencias, como así también una gran porosidad de la superficie del hormigón. En circunstancias desfavorables, este hormigón tendrá un comportamiento no satisfactorio: infiltraciones de agua, separación de agregados gruesos, aspecto harinoso y resquebrajamiento de la superficie.

Medidas preventivas

La fisuración plástica puede ser combatida de la siguiente forma:

- Agregar la cantidad mínima posible de agua de amasado.
- Utilizar un fluidificante.
- Limitar al máximo la evaporación (con las medidas descritas en el cap. 2.5 relativas al curado).
- Impedir la absorción del agua por parte del encofrado y del contrapiso (pre-humidificación).
- Renunciar al hormigonado en presencia de condiciones meteorológicas o temperaturas extremas.

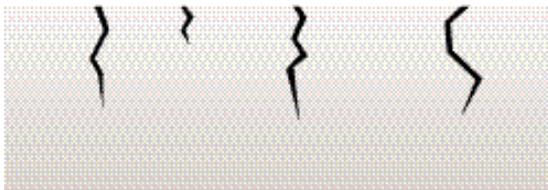


FIG. 3.2.1 Propagación de las fisuras de superficie originadas por la contracción plástica (excesiva pérdida de agua del estrato superficial).



FIG. 3.2.2 Superficie de un estacionamiento: red de fisuras debidas a la contracción plástica.

Fisuración

Luego de la fase más bien corta de la contracción plástica, el hormigón continúa perdiendo volumen a un ritmo que disminuye con el transcurrir de las semanas y los meses (Fig. 3.2.3). Esta segunda fase de la contracción se debe principalmente:

1. A la hidratación del cemento y a la pérdida de agua (contracción por secado).
2. Al descenso de la temperatura (contracción térmica) del hormigón.

Fisuras derivadas de la contracción por secado

La contracción por secado es el resultado en gran parte del lento secado del hormigón (contracción por secado), y en menor parte de la disminución del volumen originada por la reacción química del agua con el cemento (contracción autógena o endógena).

El valor final de la contracción por secado se sitúa generalmente entre 0,3 y 0,7 mm/m, dependiendo esencialmente de la relación A/C.

Puede suceder que los elementos de construcción no puedan contraerse libremente, por ejemplo bajo el efecto de un anclaje de las extremidades o de una concentración local de armaduras. Las tensiones internas resultantes pueden provocar una fisuración más o menos importante (Fig. 3.2.4).

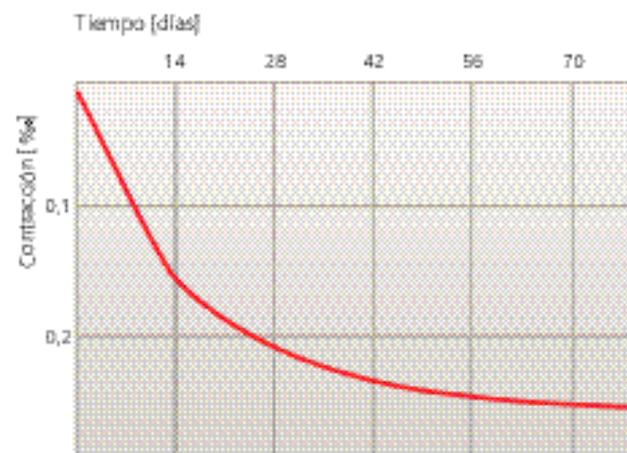


FIG. 3.2.3 Contracción del hormigón (%) en función del tiempo.



FIG. 3.2.4 Fisuras típicas de contracción en un piso de hormigón armado.

Medidas preventivas

Es raro que la contracción suceda libremente en el hormigón elaborado y sobre todo en elementos de construcción de grandes dimensiones. Con medidas oportunas, se puede "distribuir" la fisuración, o sea favorecer la formación de fisuras capilares antes que un número más reducido pero también mucho más preocupante de fisuras de mayor magnitud:

- Colocación de una armadura anti-fisuración.
- Introducción de juntas de contracción sobre grandes placas horizontales.
- Reducción de la relación A/C a fin de reducir el contenido de agua en el hormigón fresco y en consecuencia la contracción (Fig. 3.2.5).

Los cementos y los aditivos compensadores de la contracción son conocidos desde hace tiempo y a menudo recomendados para reducir la contracción del hormigón, sin embargo no se han consolidado en su aplicación práctica debido a una mayor dificultad para reproducir las condiciones externas (temperatura, humedad, etc.) en pruebas de laboratorio.

Fisuras derivadas de la contracción térmica

El calor liberado por la hidratación del cemento es la base de una forma de contracción suplementaria que se agrega a todas las otras: la contracción de origen térmico.

Luego del sensible aumento de temperatura que acompaña el fraguado, el hormigón joven se enfría en contacto con el aire y, como la mayor parte de los materiales, reduce su volumen. Dado que el hormigón se enfría más velozmente en

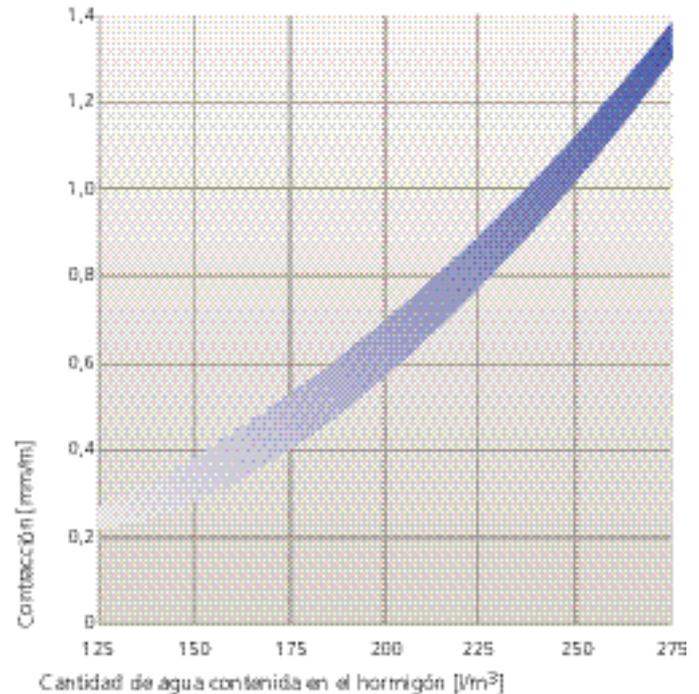


FIG. 3.2.5 Contracción del hormigón endurecido en función de la cantidad de agua contenida en el hormigón fresco.

la superficie que en el núcleo, pueden originarse tensiones sobre todo entre la zona interna que no se contrae y la zona externa que sufre la máxima contracción. Estas tensiones pueden provocar fisuras en la superficie.

Por otro lado, al igual que en la contracción por secado, si el hormigón no puede contraerse libremente, la contracción debida al enfriamiento general puede ocasionalmente causar una fisuración profunda más o menos importante.

Medidas preventivas

- Constitución de juntas de dilatación.
- Empleo de cementos de calor de hidratación relativamente reducido como los cementos con adiciones.
- Empleo de un retardante para el fraguado.
- En presencia de temperaturas elevadas, mezclar el hormigón con agua previamente enfriada.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.2 Fisuración

▶ 3.3 Carbonatación y corrosión de la armadura

Fisuras que derivan de defectos de construcción

Las fisuras del hormigón pueden ser también la consecuencia de defectos de construcción: capacidad portante insuficiente, distribución inadecuada de la armadura, disposición no idónea o ausencia de juntas, incompatibilidad entre los materiales, acomodamiento debido a reacciones imprevistas del suelo o a movimientos del terreno.

3.3 CARBONATACION Y CORROSION DE LA ARMADURA

¿Qué es la carbonatación?

Se define como carbonatación a la reacción química entre el dióxido de carbono (CO_2) contenido en el aire y el hidróxido de calcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) contenido en la pasta de cemento.

La carbonatación comienza sobre la superficie del hormigón y se propaga lentamente en profundidad. Al colmar los poros, tiene una influencia positiva aumentando la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón haciendo las veces de protección natural contra la ulterior penetración de gases y líquidos. Sólo el hormigón no armado goza entonces de estas ventajas de la carbonatación.

Efecto de la carbonatación sobre el hormigón armado

Para el hormigón armado, por el contrario, el mismo fenómeno de carbonatación puede ser el origen de serios daños estructurales. En efecto, gracias a la elevada alcalinidad que le confiere el cemento ($\text{pH} > 12$), el hormigón protege al acero de la corrosión. La carbonatación reduce la alcalinidad ($\text{pH} < 9$) y ni bien el "frente de carbonatación" alcanza la zona de la armadura, esta última comienza a oxidarse (Fig. 3.3.1). Dado que la formación de óxido se acompaña siempre con un aumento de volumen, esto acarrea generalmente la disgregación del hormigón que cubre al hierro (Fig. 3.3.2). A este punto, los hierros de la armadura no están más protegidos y el hormigón armado comienza a perder su capacidad portante.

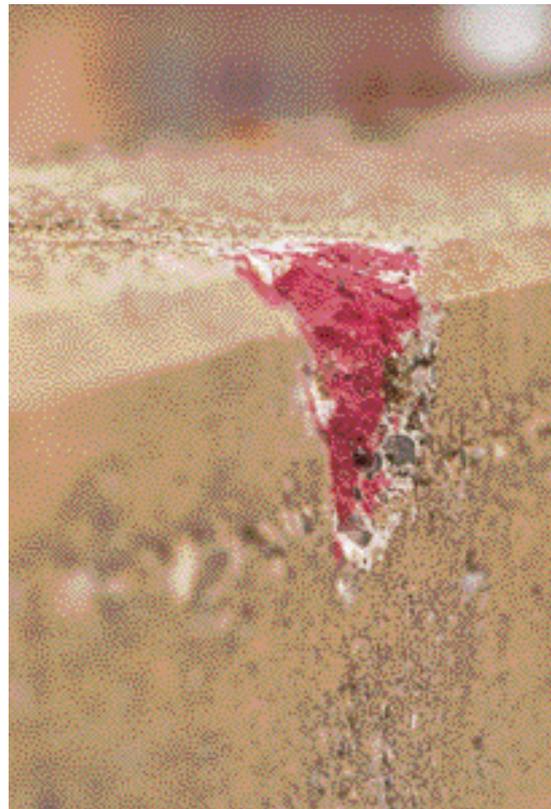


FIG. 3.3.1 Un test a la fenolftaleína pone en evidencia el frente de carbonatación sobre una grieta fresca. El hormigón carbonatado permanece gris mientras que el hormigón no carbonatado, muy alcalino, hace virar el indicador al color rojo.

Velocidad de carbonatación

La velocidad de penetración del frente de carbonatación al interior del hormigón es proporcional a su porosidad. La velocidad disminuye con el paso del tiempo debido a que el estrato carbonatado protege al resto del hormigón del contacto con el exterior (Fig. 3.3.3). La velocidad y la profundidad de carbonatación son además influenciadas por una multitud de factores como el contenido de cemento, las variaciones de temperatura y la frecuencia con que se alternan los estados secos y los estados o períodos mojados de la superficie del hormigón.

Medidas preventivas

No se debe olvidar que la carbonatación se inicia después del fraguado, ni bien el hormigón es desencofrado.

El objetivo final es el de impedir que el frente de

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.3 Carbonatación y corrosión de la armadura

▶ 3.4 Eflorescencias



FIG. 3.3.2 El frente de carbonatación ha alcanzado la profundidad de los hierros de la armadura que han comenzado a oxidarse. A causa del óxido que se forma, su volumen aumenta y el hormigón se fisura y disgrega.

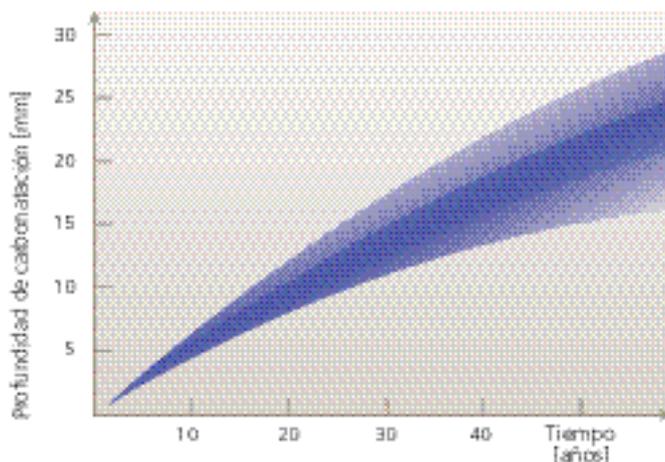


FIG. 3.3.3 La relación entre la edad del hormigón y la profundidad de carbonatación está caracterizada por una gran dispersión originada por muchos parámetros que influyen la velocidad de carbonatación.

carbonatación alcance a la armadura, por ejemplo de las siguientes formas:

- Recubriendo las armaduras en forma adecuada (mínimo 30mm). El reglamento CIRSOC 201 detalla los casos particulares. Se debe prestar una particular atención a las armaduras situadas debajo de las acanaladuras y las juntas de hormigón.
- Respetando la dosificación mínima de cemento y trabajar con relaciones A/C moderadas, o sea sin exceso de agua.
- Efectuando el curado de modo que la superficie del hormigón esté bien hidratada desde el inicio y que la velocidad de carbonatación se reduzca al mínimo.

3.4. EFLORESCENCIAS

A consecuencia de la hidratación del cemento y de la evaporación del agua, las sustancias disueltas en ella alcanzan la superficie del hormigón, se depositan en forma de manchas blancas y causan la formación de eflorescencias.

Eflorescencias de cal

Las eflorescencias más recurrentes -y también las más fastidiosas- son aquellas formadas por el hidróxido de calcio (o cal hidratada) liberado durante la hidratación del cemento.

El agua de la mezcla que se evapora de la superficie del hormigón deja un residuo de hidróxido de calcio que se transforma rápidamente, gracias al dióxido de carbono, en carbonato de calcio insoluble. La alternancia entre los estados seco y mojado de la superficie del hormigón puede hacer a este sedimento más espeso y por lo tanto visible en forma de manchas blancas (Fig. 3.4.1).

Cuando se forman las eflorescencias de cal

Las condiciones atmosféricas a las que el hormigón está expuesto juegan un rol importante. En general se puede decir que las eflorescencias se forman sobre todo con tiempo frío y húmedo (fines del otoño, inicio de la primavera). La lluvia, la nieve, la niebla y el rocío siempre favorecen su aparición.

Los factores siguientes también favorecen la formación de eflorescencias:

- Elevada porosidad del hormigón: el agua puede circular fácilmente en su masa (Fig. 3.4.2).
- Exceso de agua de mezclado.

Se subraya de todos modos que las eflorescencias no están omnipresentes sobre los hormigones normales, sino sobre todo sobre los elementos prefabricados. Esto depende esencialmente de las condiciones de almacenamiento y de colocación.

También las sales alcalinas pueden provocar eflorescencias

Ciertos depósitos blanquecinos pueden provenir también de sales alcalinas solubles en agua. Justamente gracias a su solubilidad, estas manchas pueden desaparecer después de una abundante lluvia o bien después de un simple lavado.

Eliminación de las eflorescencias

Las eflorescencias de mediana a gran intensidad pueden ser eliminadas mediante el cepillado con un trozo de lana de vidrio. También con productos adecuados que se compran en el comercio se obtienen buenos resultados. En este último caso es necesario respetar al pie de la letra la modalidad de uso y pedir consejo a los especialistas.

A veces las eflorescencias pueden desaparecer por sí solas de los elementos expuestos a la intemperie luego de años.

Medidas preventivas

Es difícil evitar completamente la formación de eflorescencias sobre elementos que forzosamente estarán expuestos a la intemperie. De todos modos se puede disminuir el riesgo de formación aplicando las siguientes medidas preventivas:

- Disminuir el agua de la mezcla (uso de fluidificantes) para obtener un hormigón compacto y poco poroso.
- Proteger el hormigón fresco de la lluvia y de la insolación directa. Evitar la formación de agua de condensación permitiendo que el aire circule entre el hormigón y su protección. Esta medida es esencial para el coronamiento de muros expuestos a la intemperie (Fig. 3.4.3).



FIG. 3.4.1 Eflorescencia sobre un muro en hormigón.



FIG. 3.4.2 Si el hormigón es poroso y el agua penetra en él constantemente, las eflorescencias pueden transformarse en verdaderas y propias condensaciones calcáreas.



FIG. 3.4.3 Eflorescencias sobre un muro de hormigón expuesto a la lluvia, 24 horas después del desencofrado.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.4 Eflorescencias

▶ 3.5 Acción del hielo y las sales anti-hielo



- Utilizar aditivos para la retención del agua (filler ultrafinos, silicafume, estearatos).
- Proteger el hormigón joven del goteo intermitente (goteras, agua de condensación).
- El uso de barnices y también resinas sintéticas protectoras es posible, pero debe ser absolutamente sometido a la opinión de un especialista.

La aparición de las eflorescencias es un fenómeno que depende de muchos factores difíciles o imposibles de controlar, a menudo dependientes del microclima local. Es necesario entonces adaptar las medidas preventivas a cada caso en particular, y de ser necesario realizar exámenes preliminares para determinar el método más eficaz.

3.5 ACCION DEL HIELO Y DE LAS SALES ANTICONGELANTES

Acción del hielo

La degradación del hormigón derivada de los ciclos de congelamiento y deshielo es causada esencialmente por la transformación en hielo del agua contenida en los agregados o en los capilares de la pasta de cemento. La formación de hielo implica un aumento de volumen aproximado del 10%. Este aumento de volumen asociado con el movimiento del agua aún no congelada en los capilares del hormigón, causa un aumento considerable de las presiones internas. Dado que la resistencia del hormigón es a menudo superada resultan ciertos daños: la repetición frecuente de los ciclos de congelamiento y de deshielo causa la aparición de una red muy densa de microfisuras en la zona superficial del hormigón. La red de microfisuras evoluciona más o menos rápidamente transformándose en resquebrajaduras y disgregaciones de la superficie.

Las caídas bruscas de la temperatura del hormigón por debajo del punto de congelación del agua son muy peligrosas cuando son rápidas y frecuentes. Téngase presente en este sentido que las superficies verticales están poco expuestas a este tipo de daños.

Acción de las sales anticongelantes

Los daños causados por las sales anticongelantes derivan esencialmente del shock térmico que estos compuestos provocan en los estratos de superficie del material, tomando del hormigón el calor necesario para fundir la nieve y el hielo que lo recubren. Estas provocan además una brusca caída de la temperatura de la superficie del hormigón, generando grandes tensiones entre el estrato en contacto con el exterior y los estratos inferiores donde la temperatura no ha variado. De esto puede resultar un rápido resquebrajamiento o la disgregación de la superficie.

El efecto destructivo de las sales anticongelantes es mucho más serio que el hielo mismo, pero también más limitado, ya que amenaza sólo a las superficies expuestas directamente a las sales anticongelantes.

La penetración de los cloruros

Las sales utilizadas generalmente son el cloruro de calcio o de potasio. Disueltas en el agua que constituye el hielo o la nieve, estos cloruros penetran más o menos en profundidad en el hormigón según su porosidad.

El hormigón como material no es atacado por los cloruros disueltos, siempre que su concentración sea baja. Esto vale por ejemplo para determinadas aguas de vertiente o para el agua vaporizada por los neumáticos de los vehículos.

El efecto de los cloruros sobre la armadura

El peligro constituido por las sales anticongelantes para el hormigón en sí mismo se limita a su función primaria de fundente, durante e inmediatamente después de su aplicación.

Pero si el "frente de penetración de los cloruros" alcanza la armadura (aunque sólo sea de modo local, por ejemplo gracias a fisuras), ésta puede ser literalmente seccionada por la corrosión electroquímica.

Para evitar este tipo de corrosión sería necesario emplear sales anticongelantes muy costosas, por ejemplo a base de glicol o urea, etc.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.5 Acción del hielo y las sales anti-hielo

Medidas preventivas

Al momento existen dos filosofías distintas en la lucha contra los efectos del hielo, y contra los efectos combinados de hielo y sales anticongelantes.

1. Hormigón denso:

La primer posibilidad consiste en confeccionar y poner en uso hormigones muy compactos (tenor de aire inferior a 1%) para reducir al mínimo la circulación del agua y la formación de hielo en los poros capilares. Este método es válido en la mayor parte de los casos.

2. Hormigón con aire incorporado:

La alternativa está dada por la presencia de micro-burbujas de aire en el hormigón, de manera de formar zonas de "descompresión" para la circulación del agua y por lo tanto para la formación del hielo. Disminuye también la presión en exceso debida al hielo en los capilares y entonces el riesgo de disgregación de la superficie.

Este método es por cierto más eficaz pero presupone el uso de aditivos incorporadores de aire (ver cap. 1.4): el uso de estos aditivos no sólo es delicado y necesita de una atención particular, sino que también causa una pérdida de resistencia a la compresión. Cada 1% de aire incorporado provoca una merma de la resistencia a compresión de 1-3 MPa.

Una de las mayores dificultades ligadas a la elaboración y colocación de los hormigones con aire incorporado reside en el hecho que el diámetro de las burbujas más grandes no deben superar 0,3 mm con una distancia entre las burbujas $< 0,4\text{mm}$.

Además, las micro burbujas deben estar distribuidas uniformemente en la pasta de cemento (sin formar aglomerados) y la terminación de las superficies no encofradas deben considerar el menor manipuleo posible (para evitar la destrucción de la red de burbujas allí donde es más necesaria) Figs. 3.5.2 y 3.5.3.

El hormigón aireado es verdaderamente indispensable sólo cuando las superficies están directamente en contacto con la sal anti-hielo.

Medidas de prevención

Independientemente del método elegido, vale lo siguiente:

- Mantener la relación A/C entre 0,45 y 0,50.
- Utilizar agregados con bajos coeficientes de dilatación.



FIG. 3.5.1 El aparato de Washington sirve para medir el tenor de aire del hormigón fresco. Sus mediciones son confiables hasta valores de aire contenido inferiores a 6%.

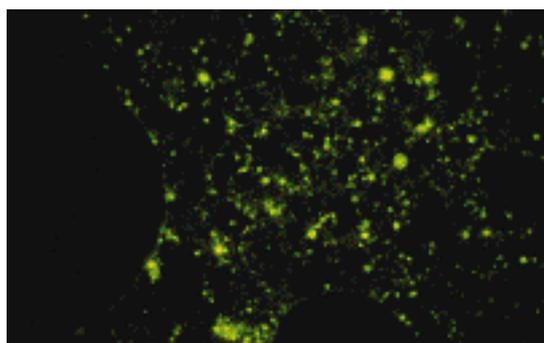


FIG. 3.5.2 Buena repartición de microburbujas en un hormigón con incorporador de aire (examen microscópico sobre corte delgado, aumento 5x).

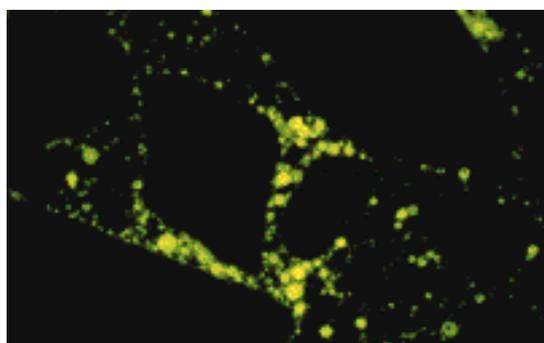


FIG. 3.5.3 Repartición de microburbujas totalmente ineficaz para resistir ciclos de congelamiento (examen microscópico sobre corte delgado, aumento 5x).

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

- ▶ 3.6 Acción de los sulfatos
- ▶ 3.7 Acción de los productos químicos



3.6 ACCION DE LOS SULFATOS

La agresión de los sulfatos

Las aguas con sulfato de calcio (aguas selenitosas) y sulfatos alcalinos son agentes agresivos para el hormigón endurecido. Combinándose con hidratos del aluminato tricálcico del cemento, los sulfatos disueltos en el agua forman compuestos expansivos: generalmente ettringita (sal de Candlot), yeso y a veces taumasita.

Zonas de riesgo y daños causados por los sulfatos

La presencia en el subsuelo de minerales con sulfato como el yeso y la anhidrita (sulfatos de calcio) constituye el riesgo principal al que se le debe conceder la atención necesaria. En efecto, las aguas subterráneas pueden disolver y transportar los sulfatos a grandes distancias. Es obvio entonces que las partes subterráneas de la construcción son las más amenazadas.

En superficie, las canalizaciones industriales pueden igualmente ser amenazadas si transportan sulfatos en solución.

El efecto de los sulfatos sobre el hormigón se manifiesta con expansión acompañada de una fisuración importante (Fig. 3.6.1). La acción de los sulfatos es de todos modos más bien lenta y por lo tanto menos peligrosa para los trabajos de carácter provisorio.

Medidas preventivas

En cuanto se prevé o se está seguro que los elementos de estructura estarán en contacto con sulfatos disueltos en el agua o también presentes en el subsuelo, es necesario tomar las siguientes precauciones:

- Usar hormigones muy compactos (o sea poco porosos).



FIG. 3.6.1 Aumento del volumen de un prisma de mezcla inmerso en una solución con alto tenor de sulfatos (mezcla confeccionada con cemento normal).

- Limitar la relación A/C a valores inferiores a 0,5.
- Tener en cuenta de que el fenómeno de capilaridad puede transportar las aguas selenitosas hacia el interior de las estructuras.
- Si el hormigón debe resistir el contacto con aguas subterráneas que contengan más de 150mg/l de SO_4^{2-} , o con estratos de terreno que contenga más de 1.000 mg/kg. de SO_4^{2-} , es necesario utilizar un cemento con elevada resistencia a los sulfatos, conforme a la norma IRAM 50.001 según el caso.



FIG. 3.6.2 Entubado confeccionado con cemento de alta resistencia a los sulfatos.

3.7. ACCION DE LOS PRODUCTOS QUIMICOS

Dos tipos de agresión química

El hormigón puede resistir como también degradarse más o menos rápidamente a consecuencia del contacto con productos químicos. Los daños son esencialmente de dos tipos:

Erosión química

La alteración del hormigón que deriva de la erosión química se da cuando el compuesto químico externo está en condiciones de disolver alguno de los componentes de la pasta de cemento (Fig. 3.7.1). Resulta entonces la lixiviación del componente disuelto: el hormigón se torna siempre más poroso y pierde materia disminuyendo su acción protectora respecto de la armadura.

Este proceso se inicia siempre sobre la superficie

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.7 Acción de los productos químicos

en contacto con el agente químico y se expande al núcleo del hormigón (habitualmente en forma lenta).

Expansión

La alteración derivada de la expansión (hinchazón) resulta de la reacción, en el interior del hormigón, entre una sustancia química penetrada desde la superficie, un constituyente de la pasta de cemento y el agua contenida en los capilares. Ni bien esta reacción produce un compuesto sólido de volumen superior a aquél de los constituyentes originales, se produce una presión interna que puede provocar la expansión de la masa, asociada a una fisuración lenta pero importante. La fisuración puede manifestarse también a cierta distancia del punto de agresión.

Medidas preventivas

La protección del hormigón contra las agresiones externas de tipo químico puede ser caracterizada por:

- Uso de un hormigón compacto, poco poroso, con una relación A/C entre 0,45 y 0,50.
- Aumento del espesor de recubrimiento (a determinar por el ingeniero en función de las agresiones externas), especialmente para las jun-



FIG. 3.7.1 Prisma de mezcla del cual la mitad izquierda ha sido sometida a la agresión ácida.

tas de hormigonado, ranuras y otras discontinuidades que reducen la protección del hormigón sobre las armaduras.

El hormigón resiste bien a los ácidos débiles. Los ácidos medios y sobre todo los ácidos fuertes lo disgregan más o menos rápida y completamente. Con respecto a la agresión ácida, vale la pena aplicar revestimientos especiales en base a resina sintética, de cerámica, etc.

Efecto de determinadas sustancias sobre el hormigón

La tabla 3.7.1 resume los efectos causados por diversas sustancias químicas (o naturales) luego de un contacto prolongado con el hormigón.

Sustancias	Comportamiento del hormigón			Comportamiento del hormigón armado
	Ninguna degradación	Erosión	Hinchazón	Corrosión de las armaduras
Bases débiles	●			
Bases fuertes	●			
Acidos débiles		◆		■
Acidos fuertes		◆◆		■
Agua de lluvia		◆		■
Agua destilada		◆		■
Agua desmineralizada		◆		■
Aceites, grasas		◆		
Sulfatos en solución			◆	■
Cloruros en solución	●			◆
Dióxido de carbono (CO ₂)	●			■

TABLA 3.7.1 Efecto de determinadas sustancias sobre el hormigón.

- Ninguna degradación.
- ◆ Agresión directa.
- Corrosión derivada de la alteración de la superficie del hormigón o de la carbonatación profunda.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.8 Reacción álcali - agregado

▶ 3.9 Resistencia al fuego



3.8 REACCIÓN ALCALI – AGREGADO

La reacción álcali-agregado es una reacción química de evolución lenta entre determinados agregados llamados “reactivos” y las sustancias alcalinas normalmente presentes en el hormigón, o transportadas por medio de agentes químicos externos. Esta reacción es la base de la expansión del hormigón y provoca una fisuración importante además de una considerable pérdida de resistencia.

La alteración del hormigón es muy conocida en países como E.E.U.U., Canadá, Sudáfrica (fig. 3.8.1) y también en Europa del Norte. Se señalan de todos modos otros casos en Francia, Alemania e Italia. El diagnóstico es difícil y la aparición puede variar de 1 hasta 40 años.

Condiciones favorables para las reacciones álcali – agregados

Esta reacción puede tener lugar sólo si se dan además estas condiciones:

- Presencia de agregados reactivos.
- Ambiente húmedo.
- Suficiente tenor alcalino del hormigón.
- Elevada porosidad del hormigón.

Medidas preventivas

En Argentina existen fuentes de agregados potencialmente reactivos, y sus efectos a largo plazo han sido observados sobre estructuras de infraestructura vial, entre otras.

La prevención de la reacción álcali – agregado se inicia con la colocación de un hormigón muy compacto con el objeto de frenar la entrada de agua al interior del hormigón. En caso de duda, y en particular si contienen sílice amorfa, los agregados pueden ser sometidos a varios tests para determinar su reactividad potencial.

Si el resultado de los tests evidenciara el peligro de una reacción álcali – agregado, se recomiendan las siguientes medidas de precaución:

- Evitar el empleo de estos agregados para los elementos expuestos (ambiente húmedo).
- Utilizar cementos con resistencia a la reacción álcali-agregado o con cantidades significativas de escoria o de una puzolana no alcalina.



FIG. 3.8.1 Coronamiento del dique de Steenbras vecino a Ciudad del Cabo (Sudáfrica). La fisuración intensa visible en estas imágenes apareció como consecuencia de la hinchazón del hormigón causada por la reacción álcali – agregado.

3.9 RESISTENCIA AL FUEGO

El hormigón y el fuego

El hormigón no se quema. Aun expuesto a temperaturas muy elevadas, el hormigón no libera ni humo ni gases tóxicos. Al contrario de otros materiales de construcción, éste frena la propagación del fuego y en consecuencia, expuesto a las llamas, se calienta muy lentamente. El hormigón constituye entonces una excelente barrera contra el fuego, aun sin revestimientos protectores particulares. Solamente una exposición intensa y prolongada causa un agrietamiento del hormigón que recubre la armadura (Fig. 3.9.1).

Temperatura crítica

Con o sin armadura, el hormigón puede soportar temperaturas de hasta 300°C sin dañarse. Esta temperatura llamada “crítica” es alcanzada lentamente en contacto con el fuego. Diversos exámenes han demostrado que, cuando la superficie del hormigón está en contacto con una llama de 1.000°C (correspondiente más o menos a un fuego de leña intenso o también a la llama del gas), la temperatura crítica alcanza una profundidad de 2 cm luego de una hora y de 5 cm luego de dos horas.

▼ 3. Origen y prevención de los daños al hormigón

▶ 3.9 Resistencia al fuego

Medidas de protección suplementarias para casos particulares

El hormigón constituye una excelente protección contra el fuego y las temperaturas muy elevadas. De ser necesario, se puede mejorar ulteriormente esta protección disminuyendo la porosidad del hormigón (reducción de la relación A/C) y aumentando el espesor del recubrimiento de armaduras.

En los casos para los cuales se prevé un gran riesgo de incendio, de carga térmica o de temperatura de servicio particularmente alta, se puede mejorar considerablemente la resistencia térmica del hormigón gracias a las siguientes medidas especiales:

- Evitar los agregados que contengan carbonatos o sílice (calcáreos, dolomía, por ejemplo) y emplear agregados resistentes al fuego como el basalto, la arcilla expandida, etc.
- Agregar estabilizadores a base de cerámica (por ejemplo la harina de laterita) para usos a temperaturas de servicio elevadas.
- Introducir en el hormigón fibras orgánicas que serán volatilizadas a consecuencia de la temperatura elevada, permitiendo la formación de microcanales a través de los cuales el agua podrá evaporarse sin crear aumento de presión.



FIG. 3.9.1 Daños causados por el fuego: la armadura es puesta al desnudo como consecuencia de la disgregación del hormigón en superficie sin que la estructura esté comprometida.

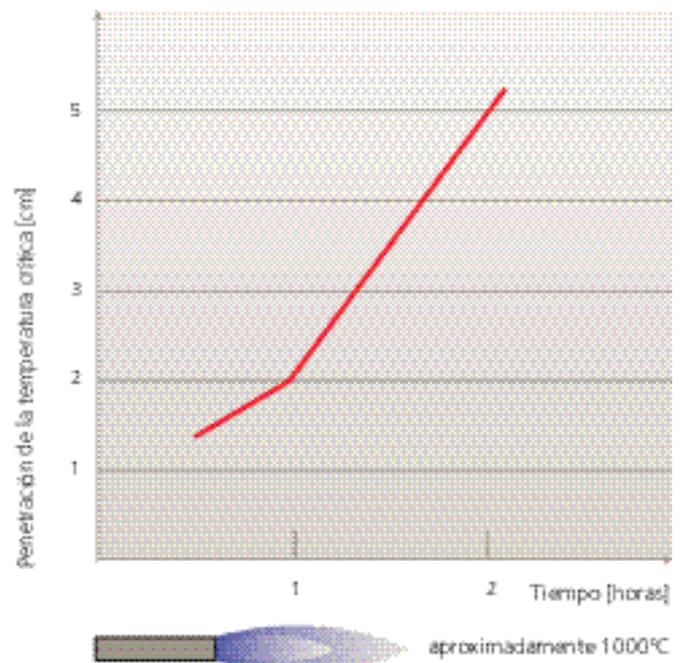


FIG. 3.9.2 Velocidad de penetración de la temperatura crítica (300°C) en el hormigón: superficie expuesta a una fuente de calor de 1.000°C.

- **Un Centro Tecnológico** altamente equipado y con profesionales capacitados para asesorarlo en todas las tareas y etapas de su obra.
- **Asistencia técnica** y asesoramiento de expertos profesionales de nivel internacional.



www.grupominetti.com.ar

Un sitio en Internet dinámico y actualizado, donde usted podrá interactuar con el mundo del cemento y el hormigón. Aquí encontrará información sobre todos nuestros productos, fichas técnicas y reportes técnicos, disponibles para "bajar" en archivos PDF.



Conexión Minetti

Nuestro Centro de Atención a Clientes, que permite llamadas gratuitas desde cualquier punto del país.

Horario extendido*

Lunes a viernes, de 8 a 20 hs.
Sábados, de 8 a 12 hs.

Además respuestas en línea en:

Pre-venta

Pedidos: solicitud y estado; situación de cuenta corriente, línea de crédito, facturación; programación de entrega de despacho y horas de salida.

Post-venta

Respuestas sobre la mejor forma de utilizar los productos Minetti, sus aplicaciones y características técnicas. Información general de la empresa.



Tel. 0800 777 6463*



Fax 0800 777 6463



CC 16, Malagueño (5101) Córdoba



conexion@grupominetti.com.ar

Copyright "HCB Cementverkauf AG"

Autores:

W. Schräml, Dr. Sc. Techn. ETH/SIA,
"Holderbank" Management y Consultora SA.

F. Worni, dipl. Bau-ing. HTL,
"HCB Cementverkauf AG"

JP Leyvraz, ing. Civil EPFL/SIA,
"HCB Suisse romande SA"

E. Ritschard, dipl. Chem. HTL,
"HCB Cementverkauf AG"

Esta traducción se ha hecho en base a la traducción italiana del texto original en alemán y francés de la 1ª edición de 1997.

Association suisse des producteurs de béton pret à l'emploi (ASPB)

Directives qualité et technique

Eclépens; 1989.

Baron/Olivier (sous la direction de)

Les bétons – bases et données pour leur formulation.

Eyrolles; Paris 1996

Beton – Handbuch

Leitsätze für Bauüberwachung und Bauausführung

Bauverlag GmbH; Wiesbaden; 1995

Boletín del Cemento Mensual del TFB

(Technische Forschung und beratung für Zement und Beton);

Wildegg.

Favre/Jaccaud/Burdet/Charif

Dimensionnement des structures en béton

Traité de génie civil de l'EPFL – vol. 8.

Presses polytechniques et universitaires romandes; Lusanne; 1997

Kosmatka/Panarese/Allen/Cumming

Design and Control of Concrete Mixtures

Portland Cement Association; Chicago; 1991.

Lamprecht/Barkauskas/Wolf

Beton – Lexikon.

Beton – Verlag; Düsseldorf; 1990.

Neville

Properties of Concrete

Langman; Burnt Mill, Harlow; 1995.

Trüb

Les surfaces de béton.

Eyrolles; Paris; 1976.

Vénuat

La pratique des ciments, mortiers et bétons.

Tome 1: La pratique des liants et des bétons.

Tome 2: Pratique du bétonnage, pathologie et applications.

Editions du Moniteur; Paris; 1989.

Los capítulos 1.1 y 1.3 no pertenecen al texto original de este manual y han sido desarrollados por la Dra. María Angélica Claria y el Ing. Raúl López.

El texto original ha sido modificado para adaptarlo a la normativa argentina.

Normas y Reglamentos

Reglamento CIRSOC 201

"Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón"

Norma IRAM 50000 (ESQUEMA)

"Cementos para uso general"

Norma IRAM 50001 (ESQUEMA)

"Cementos con propiedades especiales"

Norma IRAM 1627

"Granulometría de los agregados para hormigón"

Norma IRAM 1663

"Hormigón de Cemento Portland – Aditivos Químicos"

Norma IRAM 1601

"Agua para morteros y hormigones de Cemento Portland"

Norma IRAM 1666

"Hormigón de Cemento Portland"

Norma IRAM 1531

"Agregado grueso para hormigón de Cemento Portland"

