

DISEÑO RACIONAL DE MEZCLAS DE HORMIGÓN – MÉTODO ICPA

1. Introducción

El diseño de una mezcla es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- Selección de los constituyentes del hormigón
- Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, un hormigón de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido
- Ajuste de las cantidades estimadas mediante su ensayo en pastones de prueba.

Aunque muchas de las propiedades de los hormigones son importantes, la mayoría de los métodos están dirigidos a la obtención de cierta resistencia a la compresión con una consistencia determinada. Se asume que, si esto se logra con éxito y el hormigón está bien especificado, las otras propiedades también serán satisfactorias.

Una excepción a esto es el diseño de hormigones que sean resistentes al congelamiento u otros problemas de durabilidad, tales como el ataque por sulfato, la corrosión de armaduras, etc., situaciones que merecen un tratamiento singular en el proceso de diseño de la mezcla.

Analizaremos las siguientes consideraciones básicas con más detalle: economía, trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Economía

El costo de un hormigón está constituido por el costo de los materiales, el costo de la mano de obra y el costo del equipamiento. Sin embargo, con excepción de algunos hormigones o procesos especiales, los dos últimos aspectos son prácticamente independientes de la calidad del hormigón producido. Por lo tanto, es razonable asociar la economía a la reducción del costo de los materiales componentes.

Dado que el cemento es más costoso que los agregados, por lo general, la mezcla más económica será aquella con menor contenido de cemento sin sacrificar la calidad del hormigón. Si asociamos la “calidad” a la relación agua/cemento, es evidente que debemos reducir la demanda de agua de la mezcla empleando alguna de o todas las alternativas que se indican a continuación:

- Elegir la mezcla más seca que sea posible colocar y compactar con los medios disponibles
- Optar por el máximo tamaño máximo del agregado compatible con el tamaño del elemento, las armaduras y el recubrimiento
- Optimizar la relación entre agregados finos y gruesos

El costo relativo entre las distintas fracciones de agregado también debe tenerse en cuenta y, como esto cambia entre las distintas regiones, la mezcla más económica que satisfaga los requerimientos será distinta en cada caso.

La reducción de la cantidad de cemento (contenido unitario de cemento) tiene otras ventajas adicionales: menor contracción y menor calor de hidratación. Sin embargo, si el contenido unitario de cemento es muy bajo, pueden verse comprometidas la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia a corto plazo.

La economía asociada a un diseño particular de mezcla está vinculada también al control de calidad a implementar en condiciones de obra. La resistencia media debe ser mayor que la resistencia especificada para contemplar la variabilidad inherente a la producción del hormigón y esta diferencia es menor cuando se reduce esa variabilidad. Si los volúmenes a producir son pequeños, podría ser más económico “sobrediseñar” la mezcla que implementar el nivel de control requerido por un hormigón menos variable (económicamente más eficiente).

En la Figura 1 pueden compararse los costos relativos de distintas clases de hormigón. La Figura 2 ilustra la incidencia en el costo total de los distintos componentes, para distintas clases de hormigón, elaborados con los mismos conjuntos de materiales y para una misma consistencia (asentamiento). El conjunto de resultados es sólo ilustrativo, ya que las relaciones pueden cambiar en función de características regionales y locales.

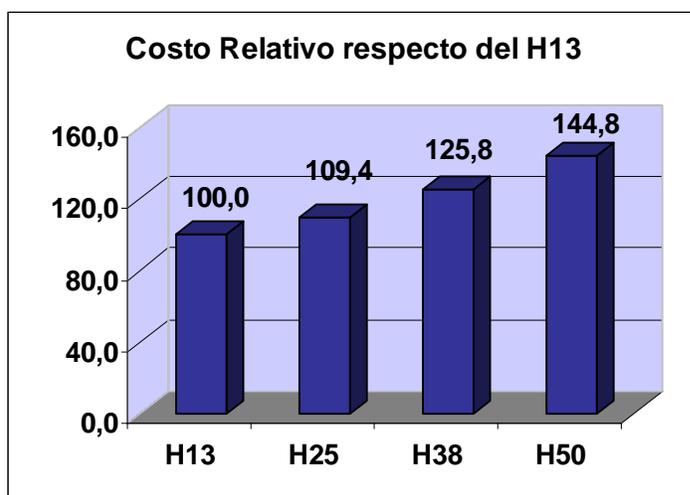


Figura 1: Costo relativo de distintas clases de hormigón tomando como valor de referencia (100) al H13. Se supone que en todos se emplea la misma categoría de cemento y el mismo conjunto de agregados.

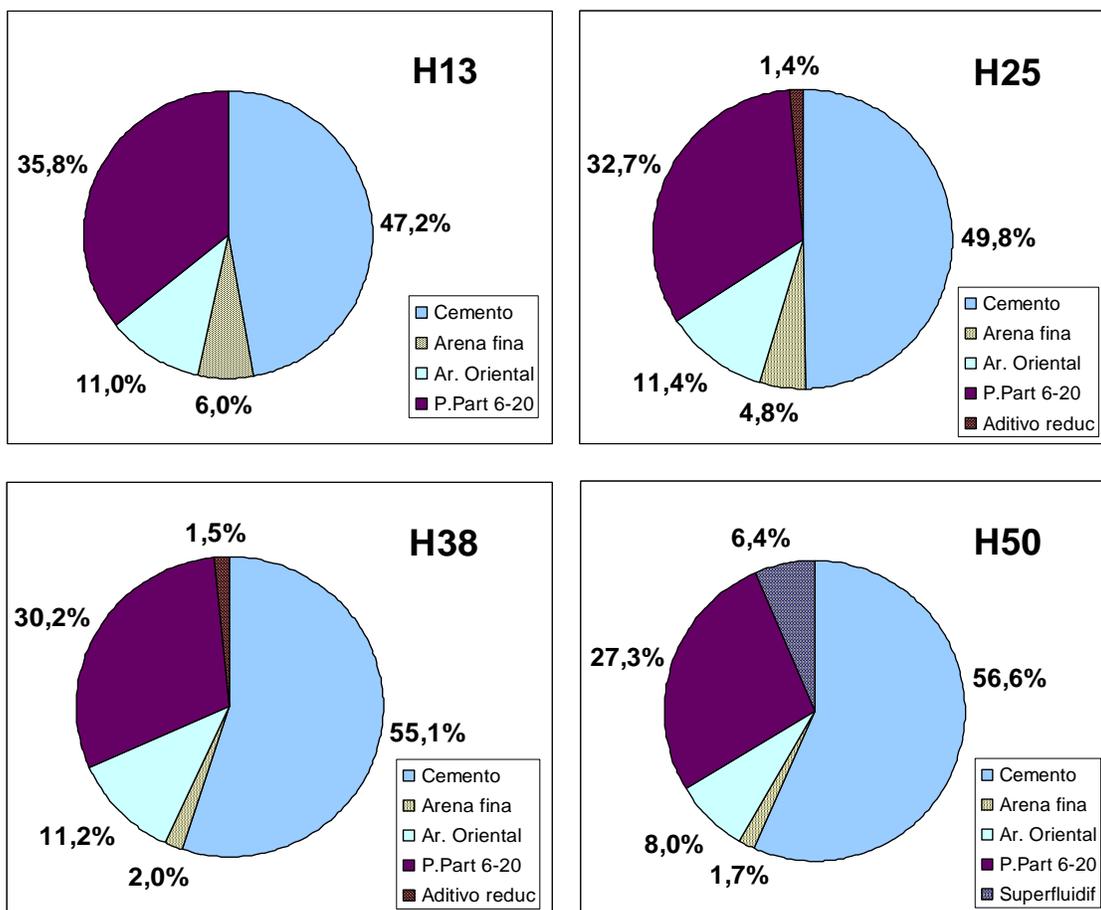


Figura 2: Incidencia de los distintos componentes en el costo total de los materiales para hormigones de distinta clase. Se supone que en todos se emplea la misma categoría de cemento y el mismo conjunto de agregados y, para cada clase, se eligió la mezcla más económica para una misma trabajabilidad.

Trabajabilidad

Sin duda, una mezcla bien diseñada debe ser capaz de ser mezclada, transportada, colocada y compactada con el equipamiento disponible. La aptitud de la mezcla para que tenga una correcta terminación también es un factor a tener en cuenta, debiendo minimizarse la exudación y la segregación.

La consistencia del hormigón fresco es una medida de su resistencia a fluir o ser deformado. El ensayo más difundido para medir esta propiedad es el ensayo del tronco de cono (IRAM 1536) que mide el asentamiento de un tronco de cono moldeado con el hormigón fresco. A mayor asentamiento, mayor fluidez (menor consistencia) de la mezcla. Como regla general, el hormigón debe suministrarse con el mínimo asentamiento que permita una correcta colocación.

La demanda de agua, para una consistencia determinada, depende fuertemente de las características de los agregados, siendo la influencia del tipo y cantidad de cemento de segundo orden.

La cooperación entre el constructor y el responsable del diseño de la mezcla es esencial para asegurar una buena dosificación y, en algunos casos, deberá optarse por una mezcla menos económica.

Resistencia y durabilidad

En general, las especificaciones de hormigón exigen una resistencia determinada a la compresión a 28 días, aunque no necesariamente es la condición dominante. Las especificaciones pueden imponer limitaciones a la relación a/c máxima admisible y al contenido unitario mínimo de cemento. Es importante asegurarse la compatibilidad entre estas condiciones para hacer un uso óptimo de las propiedades efectivas que tendrá el hormigón.

Las exigencias vinculadas a la durabilidad, tales como resistencia al congelamiento y deshielo o ataque químico, entre otras, pueden imponer limitaciones adicionales a la relación agua/cemento máxima, al contenido mínimo de cemento, al contenido de aire o a la resistencia misma.

2. Proceso de diseño de una mezcla

No es redundante destacar que el proceso de diseño de una mezcla no es tan simple como la aplicación de un método racional, cualquiera sea éste. En el desarrollo mismo de cada uno de los métodos hay que considerar la interrelación entre distintos factores que influyen en las propiedades y características de las mezclas. Un conocimiento de los conceptos básicos de la Tecnología del Hormigón es indispensable para evaluar correctamente las variables del problema.

En general, si se satisfacen las condiciones de trabajabilidad en estado fresco, los requisitos de resistencia y durabilidad en estado endurecido y la mezcla es económica, el diseño de la mezcla es exitoso. No obstante, hay veces en las que las exigencias de la obra imponen consideraciones adicionales, como por ejemplo límites a la elevación de temperatura de la masa de hormigón, límites en el valor de las contracciones para evitar la fisuración, elevada dureza superficial para soportar fenómenos de erosión, etc. Estos casos son especiales y deben ser tratados como tales.

El proceso de diseño de una mezcla no se reduce al empleo de un determinado método racional, sino que es mucho más abarcativo y debe, inexorablemente, incluir el ajuste de pastones de prueba para verificar las suposiciones efectuadas en el desarrollo analítico del diseño de la mezcla. Un ejemplo de procedimiento apropiado puede ser el siguiente:

- a) Reunión de datos necesarios de la obra y de la futura condición de exposición del hormigón.
- b) Obtención de las características de los componentes.
- c) Desarrollo analítico del diseño de mezcla (aplicación de un método racional)
- d) Ajuste en pastón de prueba.
- e) Preparación de tres pastones para verificar la relación entre resistencia y agua/cemento.
- f) Ajuste en condiciones reales de obra.
- g) Control de calidad en obra para ajustar los valores adoptados en el desarrollo analítico del diseño de la mezcla (dispersión, resistencia media, etc.).

A continuación, desarrollaremos cada uno de estos aspectos.

2-a) Datos necesarios de la obra y de la futura condición de exposición del hormigón.

2-a.1) Tamaño máximo del agregado

Si se trata de una obra de hormigón armado convencional, la separación de las armaduras y las dimensiones del elemento a hormigonar condicionarán la elección del tamaño máximo (T.M.) del agregado grueso a emplear. Estas relaciones pueden indicarse como sigue:

$$T.M. < \begin{cases} 1/3 \text{ de la altura de losas} \\ 3/4 \text{ separación de armaduras y/o espesor de recubrimiento} \\ 1/5 \text{ menor dimensión estructural} \end{cases}$$

2-a.2) Resistencia especificada

La resistencia adoptada para el cálculo de la estructura o resistencia especificada (f'_{ce}) junto con el desvío estándar que se supone se obtendrá en la producción del hormigón permiten determinar la resistencia de diseño de la mezcla (f'_{cm}). Si no se cuenta con valores propios para la dispersión real a escala de obra, pueden consultarse en la Tabla 1 desvíos estándar típicos para distintas condiciones de elaboración y control de hormigón; es prudente no subestimar el desvío estándar, para ubicarse del lado de la seguridad. Con el avance de la obra podrá corroborarse o corregirse el valor adoptado.

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

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

2-a.3) Consistencia

El tipo de estructura a hormigonar y los métodos de transporte, colocación y compactación disponibles permitirán establecer una pauta para el rango “aceptable” de la consistencia y trabajabilidad pretendidas para la mezcla. No es redundante insistir que debe elegirse “el menor asentamiento” compatible con una adecuada compactación del hormigón con las herramientas disponibles en obra. El uso de hormigones más fluidos incrementa innecesariamente el costo de la mezcla, pudiendo aparecer incluso problemas asociados a la menor estabilidad dimensional de los hormigones con exceso de agua, entre otros. No se debe obtener hormigones de elevada fluidez (Asentamiento > 15 cm) sin el auxilio de aditivos adecuados.

2-a.4) Condiciones de exposición

El análisis de la condición de exposición futura del hormigón permitirá detectar situaciones que podrían comprometer la durabilidad de la estructura. Debe tenerse especial cuidado con la exposición del hormigón a bajas temperaturas, a soluciones con ión sulfato, a los ambientes marinos o contaminación con cloruros. En estos casos, deberá imponerse relaciones agua/cemento máximas, contenidos mínimos de cemento o cierta resistencia característica, tal como se verá más adelante.

2-b) Obtención de las características de los componentes.

Un método racional de diseño de mezclas debe tener en cuenta las características de los materiales componentes, dado que éstas influyen en las propiedades del hormigón fresco y endurecido y, por lo tanto, en las proporciones a emplear de cada uno de esos componentes.

2-b.1.) Cemento Portland

Para obras comunes, cualquier tipo de cemento de uso general resultará adecuado. El análisis de la correcta selección de un cemento para un uso particular excede el alcance de este texto; se sugiere consultar algún texto específico al respecto.

Un parámetro a considerar en los cementos Portland de uso general es su **caracterización por resistencia**. Si bien no existe una relación biunívoca entre la resistencia del cemento, tal como se evalúa según la norma IRAM 1622, y la resistencia de los hormigones elaborados con ese cemento, puede decirse que existe “a priori” una cierta vinculación: en general, un cemento de mayor resistencia permitirá obtener hormigones también más resistentes. Tal como lo expresa el Abaco 2 de este método, para una misma relación agua/cemento, el empleo de un cemento más resistente conduce a mayor resistencia del hormigón.

Un dato que debe conocerse para completar el método es la **Densidad** o **Peso específico** del cemento. Dada la variedad de tipos de cemento que hay en el mercado, no es lícito estimar siempre a la densidad como $3,15 \text{ kg/dm}^3$. El uso de adiciones generalmente provoca una leve reducción de la misma. Ante la imposibilidad de determinar experimentalmente esta propiedad en obra, se sugiere consultar al fabricante del cemento.

2-b.2.) Agregados

Una vez constatada la aptitud de los agregados que se emplearán, se debe conocer los parámetros requeridos por el método racional que se emplee, así como las absorciones y densidades relativas.

En ciertas circunstancias, no es posible determinar experimentalmente todos los parámetros, lo que impone la necesidad de estimarlos. En estos casos, se pierde capacidad de predicción y es posible que se necesiten más pastones de prueba (tanteos experimentales) para llegar a una solución razonable.

Para el método ICPA sólo se requieren la granulometría, la densidad y la absorción de cada fracción de agregado que se emplee.

2-b.3.) Aditivos

La decisión de la oportunidad o necesidad del empleo de aditivos excede el objetivo de esta publicación; sin embargo, el método contempla el uso de distintos tipos, básicamente los incorporadores de aire y los reductores de agua o fluidificantes (plastificantes).

En el primer caso, puede esperarse una cierta cantidad de aire que depende, entre otros factores, de la dosis de aditivo, el tamaño máximo del agregado y la consistencia de la mezcla, así como un efecto secundario de reducción en la cantidad de agua de mezclado y disminución

de la resistencia. Con el uso de reductores de agua o fluidificantes, la reducción en la demanda de agua “esperada” permite distintas alternativas: disminución de la relación agua/cemento, aumento de la fluidez o una reducción en el contenido de cemento.

No es redundante indicar que, en ningún caso se emplearán aditivos si no pueden medirse los materiales en peso en el momento de la elaboración de los hormigones. Además, no deberán mezclarse distintos aditivos en el mismo vaso dosificador, salvo indicación expresa del fabricante.

2-c) Desarrollo analítico del diseño de la mezcla. Método ICPA

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

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

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

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

ETAPAS

1. Elección del cemento a emplear (categorización por resistencia: CP30 – CP40 – CP50)
2. Elección de una consistencia adecuada.
3. Decidir si se incorporará aire en forma intencional.
4. Distribución granulométrica de agregados -
 - a) Seleccionar una curva o ámbito granulométrico apropiado para el agregado total
 - b) Selección y ajuste de las fracciones disponibles para ajustarse a lo seleccionado en 4.a (Mezcla de las distintas fracciones)
 - c) Cálculo del Módulo de Finura (MF) del Agregado Total, contemplando los retenidos sobre los tamices de la serie normal
5. Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y el MF del agregado total.
6. Cálculo de la resistencia de diseño, f'_{cm} , en función de la resistencia especificada (f'_{ce}) y el

desvío estándar (S). Verificación del cumplimiento de la f'_{cm} mínima por razones de durabilidad.

7. Estimación de la relación a/c.
 - a) Determinación de la relación agua/cemento necesaria en función de la resistencia media a la edad de 28 días para las distintas categorías de cemento.
 - b) Verificación del cumplimiento de eventual relación agua/cemento máxima por razones de durabilidad.
8. Cálculo del contenido unitario de cemento y verificación del cumplimiento de eventual contenido de cemento mínimo por razones de durabilidad.
9. Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso 4.b

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

Simultáneamente al desarrollo explícito del método, desarrollaremos un ejercicio que ayudará a comprender la aplicación de la metodología, impreso en cursiva para evitar confusiones.

Ejercicio: *Se deben obtener las proporciones adecuadas para elaborar un hormigón H-30 que soportará efecto de congelamiento y deshielo y ataque por agua de mar. La separación de armaduras es de 30 mm y el espesor de recubrimiento es de 50 mm.*

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

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

Tabla 2: *Granulometría de los agregados a emplear.*

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

Nota: los tamices indicados en la Tabla 2 corresponden a los efectivamente utilizados en la determinación experimental. Es conveniente emplear los tamices ISO, adoptados por la norma IRAM 1501.

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

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

La clase de hormigón impone el empleo de un cemento CP40 ó CP50. Además, la condición de exposición indica que habrá ataque por agua de mar, por lo que sería prudente elegir un cemento con adiciones hidráulicamente activas. Es decir, podremos optar por un cemento CP40 puzolánico, densidad = 3,10 kg/dm³.

2-c.2. Elección de la consistencia (asentamiento) adecuada.

Tal como se indicó, debe estimarse qué consistencia es la que proporcionará una correcta trabajabilidad al hormigón. No debe asociarse a un hormigón fluido con uno trabajable; debe evaluarse la disponibilidad del equipamiento para colocar y compactar el hormigón, el tipo de estructura a hormigonar y la densidad de armaduras (si las hubiera). Es prudente recalcar que debe elegirse el mínimo asentamiento compatible con una buena compactación.

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

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

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

(*) Nota: se recomienda el empleo de la Mesa de Graf, IRAM 1690. Deben emplearse aditivos superfluidificantes.

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

2-c.3. Decidir si se incorporará aire en forma intencional

El análisis de las condiciones de exposición puede revelar que el hormigón estará expuesto frecuentemente a temperaturas de menos de - 2 °C en condiciones de elevada humedad interna o saturación. En ese caso, es imprescindible diseñar un hormigón con aire intencionalmente incorporado, objetivo que se consigue mediante el auxilio de un aditivo incorporador de aire en la dosis necesaria y un correcto mezclado. La cantidad de aire necesaria puede estimarse de la Tabla 4. A medida que aumenta el tamaño máximo, disminuye la cantidad de aire necesaria para proveer una adecuada protección al hormigón frente a ciclos de congelamiento y deshielo. La incorporación intencional de aire influye también sobre la resistencia a la compresión y sobre la demanda de agua, es decir, el agua necesaria para obtener el asentamiento seleccionado en el Paso 2.

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

$$\Delta f'_{cm} = -0,05 \times (\text{Aire \%} - 1) \cdot f'_{cm}$$

En lo que respecta a la disminución en la demanda de agua, puede estimarse que se debe reducir en un 2 a 3% el agua de mezclado por cada 1 % de incremento en el contenido de aire.

$$\Delta \text{Agua} = -0,025 \times (\text{Aire \%} - 1) \cdot \text{Agua}$$

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

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

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

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

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

Exposición Hormigón expuesto al interior o al exterior que no estará sujeto a ciclos de

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

Para decidir la incorporación intencional de aire, es suficiente constatar que el hormigón estará expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo estando saturado y, además, estará expuesto a agentes agresivos (agua de mar), por lo que se establece un contenido de aire de 6 % como objetivo.

Definido el % de aire, debemos estimar su influencia sobre la resistencia a la compresión y sobre la demanda de agua. Para el primer caso, aplicaremos la fórmula indicada: Pérdida de resistencia = $-0,05 \times (\text{Aire \%} - 1) = 0,05 \times (6 - 1) = 0,25$; esto es, un 25 % de pérdida.

En lo que respecta a la demanda de agua, estimaremos una reducción de 2,5 % por cada 1 % en exceso de aire incorporado, es decir, 12,5 % menos del agua indicada por el ábaco.

2-c.4. Distribución granulométrica de agregados

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

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

Algunas normas o reglamentos dan entornos de “preferencia”, como los dados por las normas DIN o IRAM 1627 y puede emplearse cualquiera de ellos para una primera aproximación. Otra alternativa es emplear las curvas teóricas de máxima compacidad como criterio de ajuste de las proporciones de las distintas fracciones (parábola de Fuller, por ejemplo).

La parábola de Fuller está determinada por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Pasa (un tamiz de abertura } d) = 100 (d / \text{T.M.})^{0,5} \text{ siendo T.M. el tamaño máximo del agregado}$$

No siempre es posible verificar el cumplimiento del entorno granulométrico con los agregados disponibles. Para estos casos, el Reglamento CIRSOC 201 cita en el artículo 6.3.2.3. Curvas granulométricas discontinuas: “En el caso en que los distintos tamaños de agregados

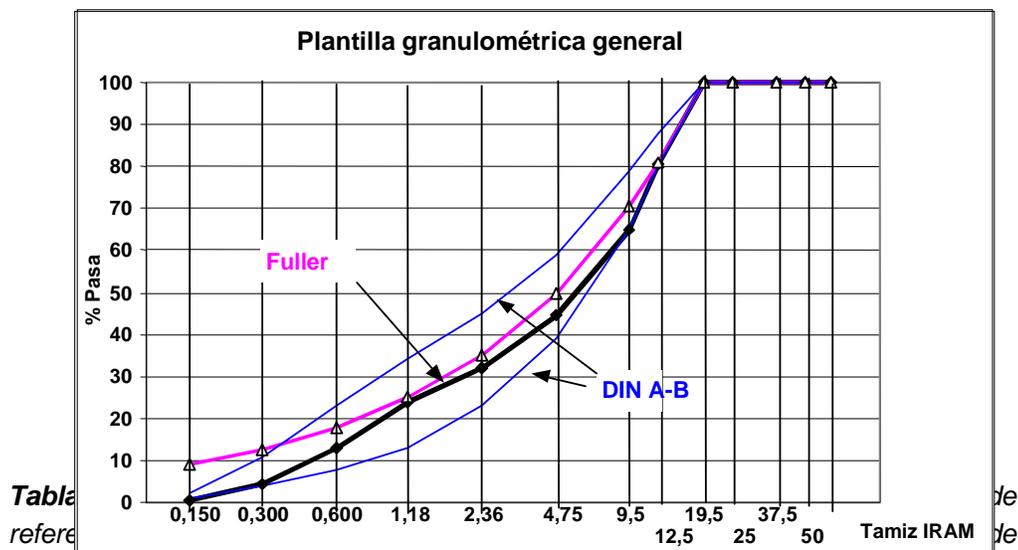
disponibles no permitan componer una curva granulométrica continua por falta de partículas, de determinadas dimensiones, se podrá utilizar una curva granulométrica discontinua . Deberá demostrarse, mediante ensayos de laboratorio, que con la granulometría propuesta se pueden obtener hormigones de trabajabilidad adecuada, con contenidos unitarios de cemento y agua compatibles con las características necesarias para la estructura y los métodos constructivos a utilizar.”

Como regla general, es preferible trabajar con al menos dos fracciones para el agregado fino y otras dos fracciones para el agregado grueso, de forma de tener la posibilidad de “ajustar” la mezcla a la distribución seleccionada y obtener uniformidad en el proceso productivo del hormigón.

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

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

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



Fuller correspondiente a 19 mm de tamaño máximo.

Abertura Tamiz	Mezcla de	TM Nominal (mm):	19,0
----------------	-----------	------------------	------

IRAM (mm)	Agregados	Límites según Norma:			Fuller
		A	B	DIN C	
63	100,0	100	100	100	100,0
50	100,0	100	100	100	100,0
37,5	100,0	100	100	100	100,0
25,0	100,0	100	100	100	100,0
19,0	100,0	100	100	100	100,0
12,5	80,5	80	88	94	81,1
9,5	64,7	65	79	89	70,7
4,75	44,5	39	59	76	50,0
2,36	32,0	23	45	63	35,2
1,18	23,8	13	34	51	24,9
0,600	12,9	8	23	37	17,8
0,300	4,4	4	11	22	12,6
0,150	0,5	1	2	5	8,9

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

Aclaración: para la mezcla de agregados se empleó un programa simple, desarrollado en Excel, que está a disposición de quien lo solicite en el Instituto del Cemento Portland Argentino (Centro de Información al Usuario – Biblioteca).

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

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

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

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

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

*Como el aire intencionalmente incorporado por razones de durabilidad es de 6 %, debe contemplarse la **reducción** en la demanda de agua correspondiente.*

*Reducción estimada de la cantidad de agua: 2,5 % x (6 - 1) = **12,5 %***

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

Por lo tanto, la cantidad de agua corregida : $173 \times (1,07) \times (1 - 0,125) = 162 \text{ litros}$

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

2-c.6. Determinación de la resistencia de diseño (Resistencia media) (f'_{cm})

La determinación de la resistencia de diseño de la mezcla debe hacerse en función de los requerimientos de la obra (resistencia característica proyectada) y del tipo de elaboración y control previstos para la etapa de ejecución. En la Tabla 1 se indicaron algunos valores típicos del desvío estándar esperable. Es recomendable verificar, en condiciones de producción en la obra, si el valor adoptado se corresponde con el valor real de la dispersión; en caso de ser necesario, debe hacerse un ajuste de la dosificación.

Para estimar la resistencia media de diseño de la mezcla (f'_{cm}) en función del valor de resistencia especificada (f'_{ce}) y del desvío estándar (S) puede emplearse la fórmula $f'_{ce} = f'_{cm} - 1,65 S$. El coeficiente 1,65 corresponde al percentil 5 % para la curva normal o de Gauss, tal como define el Reglamento CIRSOC 201 a la resistencia característica. Si se empleara otro percentil diferente para la definición de valor característico, debe buscarse el coeficiente correspondiente en una tabla de distribución normal.

$$\text{CIRSOC 201 – 1982 : } f'_{cm} = f'_{ce} + 1,65 S$$

El Reglamento ACI 318 sugiere que se comparen dos valores, eligiendo el mayor de ambos. El primero [1], se calcula en forma análoga a lo expuesto anteriormente, pero emplea el coeficiente 1,34, y corresponde a una probabilidad de 1 en 100 que el promedio de cada tres valores consecutivos (media móvil) sea inferior a la resistencia especificada. El segundo valor [2] corresponde a una probabilidad similar de que los ensayos individuales sean menores que la resistencia especificada menos 3,5 MPa.

Según ACI 318:

f'_{cm} será la mayor entre

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

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

Nota : algunos reglamentos indican valores mínimos de resistencia para asegurar la durabilidad de los hormigones y las estructuras. En ese caso, debe constatar que el valor que se adopta para la resistencia característica verifique el requisito de durabilidad determinado por la condición de exposición.

En nuestro caso, para mayor simplicidad, emplearemos la fórmula indicada por el Reglamento CIRSOC 201-1982, adoptando un desvío esperable de la Tabla 1 que corresponde a la medición en peso de todos los componentes $S = 4$ MPa, entonces: $f'_{cm} = f'_{ce} + 1,65 S = 30 \text{ MPa} + 1,65 \times 4 \text{ MPa} = 37 \text{ MPa}$

2-c.7. Estimación de la relación a/c máxima

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

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

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

En forma análoga, si se decidiera dosificar una mezcla para una edad de diseño diferente de 28 días, puede usarse el mismo ábaco si se conoce la relación entre las resistencias a esa edad y la correspondiente a 28 días. Por ejemplo : si se deseara producir un hormigón de 20 MPa de resistencia media a la edad de 7 días y se sabe que la relación entre la resistencia a 7 días y 28 días es del 80 %, entonces deberíamos elegir la relación agua/cemento correspondiente a $20 \text{ MPa} / 0,80 = 25 \text{ MPa}$.

Si el hormigón diseñado tuviera aire incorporado en forma intencional, el efecto de reducción de la resistencia por este motivo puede estimarse como sigue: si se contempla una reducción de un 5 % en la resistencia por cada 1 % de aire incorporado por encima del 1 %, el cálculo del factor es sumamente sencillo y se aplica como en los casos anteriores.

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

Reducción de resistencia por incorporación de aire: $(6 - 1) \times 0,05 = 25 \%$

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

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

$$f'_{cm} (\text{ábaco}) \times 1,20 \times (1-0,25) = 37 \text{ MPa}$$

$$f'_{cm} (\text{ábaco}) = 37 \text{ MPa} / (1,20 \times 0,75) = 41 \text{ MPa}$$

Entonces, para 41,0 MPa y un CP 40, corresponde una relación agua/cemento máxima de 0,39.

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

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

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

Condición de exposición	a/c máx (en peso)	Observaciones
Frecuente o continuamente humedecido y expuesto a los efectos de la congelación y deshielo		
<ul style="list-style-type: none"> secciones de espesor menor de 500 mm o con recubrimientos libres de las armaduras menores de 25 mm, y todo hormigón expuesto a la acción de sales descongelantes Todo otro tipo de estructuras 	0,45 0,50	(1) (2)
Estructuras expuestas al aire, a la intemperie, clima lluvioso o semiárido. Sólo por excepción temperaturas < 0 °C	0,53	

Tabla 7 : Continuación

Condición de exposición	a/c máx (en peso)	Observaciones
Cisternas y depósitos para agua, conductos, tuberías y toda estructura que deba resultar impermeable y estar destinada a contener agua o soluciones no agresivas : <ul style="list-style-type: none"> • espesores de 100 a 400 mm • espesores mayores 	0,48 0,53	
Fundaciones de hormigón armado o pretensado y otras estructuras enterradas en contacto con : <ul style="list-style-type: none"> • aguas o suelos húmedos, no agresivos • agua de mar 	0,50 0,45	(3)
Estructuras en ambientes cerrados con frecuentes contactos con aire muy húmedo y fuertes condensaciones a temperatura ambiente (cocinas industriales, baños públicos, lavaderos, ambientes húmedos de natatorios y establos)	0,53	
En contacto con sulfatos solubles en agua : <ul style="list-style-type: none"> • Ataque débil o moderado. Concentraciones de sulfato (como SO₄⁻), en muestras de suelos, comprendidas entre 0,10 y 0,20 % en masa (1000 y 2000 mg/kg), o entre 200 y 1500 ppm (mg/l) en muestras de agua • Ataque fuerte, idem, en muestras de suelos comprendidas entre 0,2 % y 2,0 % en masa (2000 a 20000 mg/kg), o entre 1500 y 10000 ppm (mg/l) en muestras de agua • Ataque muy fuerte. Idem, en muestras de suelos mayores de 2,0 % (20000 mg/kg) o de 10000 ppm (mg/l) en muestras de agua 	0,53 0,45 0,45	(3) (4) (5)
• En contacto con otras sustancias o líquidos químicamente agresivos (agresión ácida, etc.)	0,40	(6)
• Hormigón colocado bajo agua mediante el método de tolva y tubería vertical	0,45	

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

(3) Cemento Portland MRS

(4) Cemento Portland ARS

(5) Conviene CP Puzolánico + ARS

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

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

Resulta sencillo verificar que para la condición de exposición de nuestro hormigón, la relación agua/cemento máxima por resistencia es inferior a la necesaria para asegurar la durabilidad de la estructura (0,45). Es decir, la relación agua/cemento = 0,39 verifica las condiciones de resistencia y durabilidad.

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

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

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

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

$$\text{Contenido unitario de cemento} = \text{Agua de mezclado} / a/c = 162 / 0,39 = 415 \text{ kg/m}^3$$

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

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

Alternativa a: ecuaciones en “peso”.

$$\text{Volumen total de agregados} = 1000 \text{ litros} - \Sigma \text{Volúmenes del (agua+cemento+aire)}$$

$$\text{Peso de Ag. grueso1} = \text{Volumen total de agregados} \times \% \text{ de AG}_1 \text{ en la mezcla} \times \text{Pe}_{\text{AG1}}$$

$$\text{Peso de Ag. grueso 2} = \text{Volumen total de agregados} \times \% \text{ de AG}_2 \text{ en la mezcla} \times \text{Pe}_{\text{AG2}}$$

y así siguiendo.

Alternativa b: ecuaciones en volumen

Si $\text{Pe}_{\text{AG1}} \neq \text{Pe}_{\text{AG2}} \neq \text{Pe}_{\text{AF1}}$, entonces se plantea el siguiente sistema de ecuaciones, para trabajar en volúmenes :

$$\text{Volumen total de agregados} = 1000 \text{ litros} - \Sigma \text{Volúmenes del (agua+cemento+aire)} \quad (1)$$

$$\text{Volumen total de agregados} = \Sigma \text{Va}_i = \text{Peso}_{\text{AG1}}/\text{Pe}_{\text{AG1}} + \text{Peso}_{\text{AG2}}/\text{Pe}_{\text{AG2}} + \dots + \text{Peso}_{\text{AFn}}/\text{Pe}_{\text{AFn}} \quad (2)$$

$$\text{Volumen total de agregados} = \sum V_{a_i} = P_{\text{total}} \left[\frac{\%_{AG1}}{P_{eAG1}} + \frac{\%_{AG2}}{P_{eAG2}} + \dots + \frac{\%_{AFn}}{P_{eAFn}} \right] \quad (3)$$

Igualando (1) con (3) se obtiene el P_{total} del agregado, el que se distribuye luego según los porcentajes de participación en la mezcla, según 4.B (% AG1, % AG2, ... , % AFn)

$$P_{AG1} = P_{\text{Total}} (\text{de Agregados}) \times \% \text{ AG}_1 / 100$$

$$P_{AG2} = P_{\text{Total}} (\text{de Agregados}) \times \% \text{ AG}_2 / 100$$

Finalmente, para expresar los Pesos de los agregados en condición de “saturados a superficie seca”, es necesario multiplicar los valores calculados por $(1 + Abs)$ del agregado.

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

Tabla resumen del proceso de diseño

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón (1) kg	Densidad (2) kg/dm ³	Volumen sólido (3) dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón (4) kg	Peso húmedo para 1 m ³ (5) kg
Agua					
Cemento					
Ag. grueso 1					
Ag. grueso 2					
Ag. fino 1					
Ag. fino 2					
Aire	---				
Aditivo					
SUMAS					

(1) Valores obtenidos siguiendo el método adoptado.

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

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

(4) Se multiplican los pesos de los agregados de la columna (1) por el factor $(1 + Abs / 100)$

(5) Se multiplican los pesos secos de los agregados de la columna 1 por $(1 + h)$. La diferencia entre los pesos de los agregados húmedos y los pesos en condición de saturados a superficie seca debe “restarse” al agua de amasado. Si esta diferencia fuera negativa (tendencia a “absorber” agua de la mezcla), es prudente multiplicarla por 0,7.

Las sumas correspondientes a las columnas (4) y (5) deben ser idénticas.

Completaremos entonces las tres primeras columnas de la tabla, con nuestros datos.

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón kg	Densidad kg/dm ³	Volumen sólido dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m ³ kg
Agua	162	1	162		
Cemento	415	3,10	134		
Ag. grueso		2,65			
Arena gruesa		2,65			
Arena fina		2.65			
Aire	---		60		
Aditivo					
SUMAS			1000		

Para completar el metro cúbico (1000 litros), podemos calcular fácilmente que **quedan libres 644 litros de la mezcla**, los que deben completarse con los agregados en las proporciones adecuadas.

Si recordamos que del paso 4 concluimos en que las proporciones de arena fina, arena gruesa y piedra partida 6-20 son 19 %, 18 % y 63 % respectivamente, podemos simplemente emplear estas proporciones en forma directa, dado que las densidades relativas de los agregados son idénticas. Esto es, el volumen sólido ocupado por la arena fina será 645 litros x 0,19 = 123 litros. El volumen sólido ocupado por la arena gruesa será 645 litros x 0,18 = 116 litros y el ocupado por la piedra, 645 x 0,63 = 406 litros.

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón kg	Densidad kg/dm ³	Volumen sólido dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m ³ kg
Agua	162	1	162		
Cemento	415	3,10	134		
Ag. grueso		2,65	406		
Arena gruesa		2,65	116		
Arena fina		2.65	122		
Aire	---		60		
Aditivo					
SUMAS			1000		

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

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón kg	Densidad kg/dm ³	Volumen sólido dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m ³ kg
Agua	162	1	162		
Cemento	415	3,10	134		
Ag. grueso	1076	2,65	406		
Ag. fino 1	307	2,65	116		
Ag. fino 2	323	2.65	122		
Aire	---		60		
Aditivo					
SUMAS			1000		

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

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón kg	Densidad kg/dm ³	Volumen sólido dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m ³ kg
Agua	162	1	162	162	
Cemento	415	3,10	134	415	
Ag. grueso	1076	2,65	406	1081	
Arena gruesa	307	2,65	116	309	
Arena fina	323	2.65	122	326	
Aire	---		60		
Aditivo					
SUMAS			1000	2293	

La suma de la columna (4) da una indicación del peso de la unidad de volumen o peso unitario en estado fresco, es decir, el PUV calculado del hormigón es 2293 kg/m³.

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

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

$$Ph (\text{Ag. grueso}) = 1076 \text{ kg} \times (1,01) = 1087 \text{ kg}$$

$$Ph (\text{Ar. gruesa}) = 307 \text{ kg} \times (1,03) = 316 \text{ kg}$$

$$Ph (\text{Ar. fina}) = 323 \text{ kg} \times (1,045) = 338 \text{ kg}$$

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

$$Ph \text{ (Ag. grueso)} - P_{sss} \text{ (Ag. grueso)} = 1087 \text{ kg} - 1081 \text{ kg} = 6 \text{ kg}$$

$$Ph \text{ (Ar. gruesa)} - P_{sss} \text{ (Ar. gruesa)} = 316 \text{ kg} - 309 \text{ kg} = 7 \text{ kg}$$

$$Ph \text{ (Ar. fina)} - P_{sss} \text{ (Ar. fina)} = 338 \text{ kg} - 326 \text{ kg} = 12 \text{ kg}$$

$$\text{Total} = 25 \text{ kg} = 25 \text{ litros}$$

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

$$\text{Agua a emplear en el amasado} = 162 \text{ litros} - 25 \text{ litros} = 140 \text{ litros}$$

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón kg	Densidad kg/dm ³	Volumen sólido dm ³	Peso (SSS) por m ³ de hormigón kg	Peso húmedo para 1 m ³ kg
Agua	162	1	162	162	137
Cemento	415	3,10	134	415	415
Ag. grueso	1076	2,65	406	1081	1087
Arena gruesa	307	2,65	116	309	316
Arena fina	323	2.65	122	326	338
Aire	---		60		
Aditivo					
SUMAS			1000	2293	2293

2-d. Ajuste en pastones de prueba y cálculo del rendimiento de la mezcla

Los valores que hemos empleado, tanto de tablas como de ábacos, corresponden a estimaciones, por lo que es indispensable ahora preparar un pastón preliminar, llamado pastón de prueba, para ajustar las proporciones en forma experimental.

Se debe evaluar el aspecto de la mezcla (muy arenoso, arenoso, normal, pedregoso, muy pedregoso, etc.), medir su asentamiento en el tronco de cono, determinar su peso unitario, temperatura y contenido de aire.

Si el aspecto no fuera el correcto, se deben modificar las proporciones relativas de los agregados y recién entonces, debe corregirse la cantidad de agua para ajustar el asentamiento. Esto es así porque los cambios en la cantidades de agregado fino y grueso ejercen una influencia notable sobre la demanda de agua.

La suma de las columna (4) se denomina Peso Unitario Calculado del Hormigón y debe coincidir con el que se determine, en forma experimental, al ajustar el pastón de prueba. Si el PU_{exp} es mayor que el calculado, esto indica que las cantidades de materiales no alcanzan para completar el metro cúbico. En caso contrario, estaríamos preparando más de un metro cúbico de hormigón. De existir diferencia entre el PU_{exp} y el PU_{calc} , los valores de la columna (4) deben corregirse mediante el factor PU_{exp}/PU_{calc} .

2-e. Preparación de tres pastones para verificar la relación entre la resistencia y la razón a/c

Una vez que se ha logrado un pastón de prueba de trabajabilidad y aspecto satisfactorio, es recomendable preparar tres pastones casi idénticos, con variaciones en la relación agua/cemento de +0,05 y -0,05. De esta manera, se obtienen valores experimentales de la relación entre la resistencia y la razón agua/cemento, válido para el conjunto de materiales con que se está trabajando, que permitirá establecer la relación agua/cemento definitiva.

2-f. Ajuste a las condiciones reales de obra.

Es importante destacar que las condiciones de elaboración (tipo de mezcladora, tiempos de mezclado, sensibilidad de balanzas, temperatura, etc.) en un laboratorio difieren sensiblemente de las condiciones reales de trabajo en la obra. Por lo tanto, es razonable esperar algunos ajustes cuando se reproduzca la mezcla en escala de obra. Estos ajustes deben hacerse en forma racional para mantener las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido.

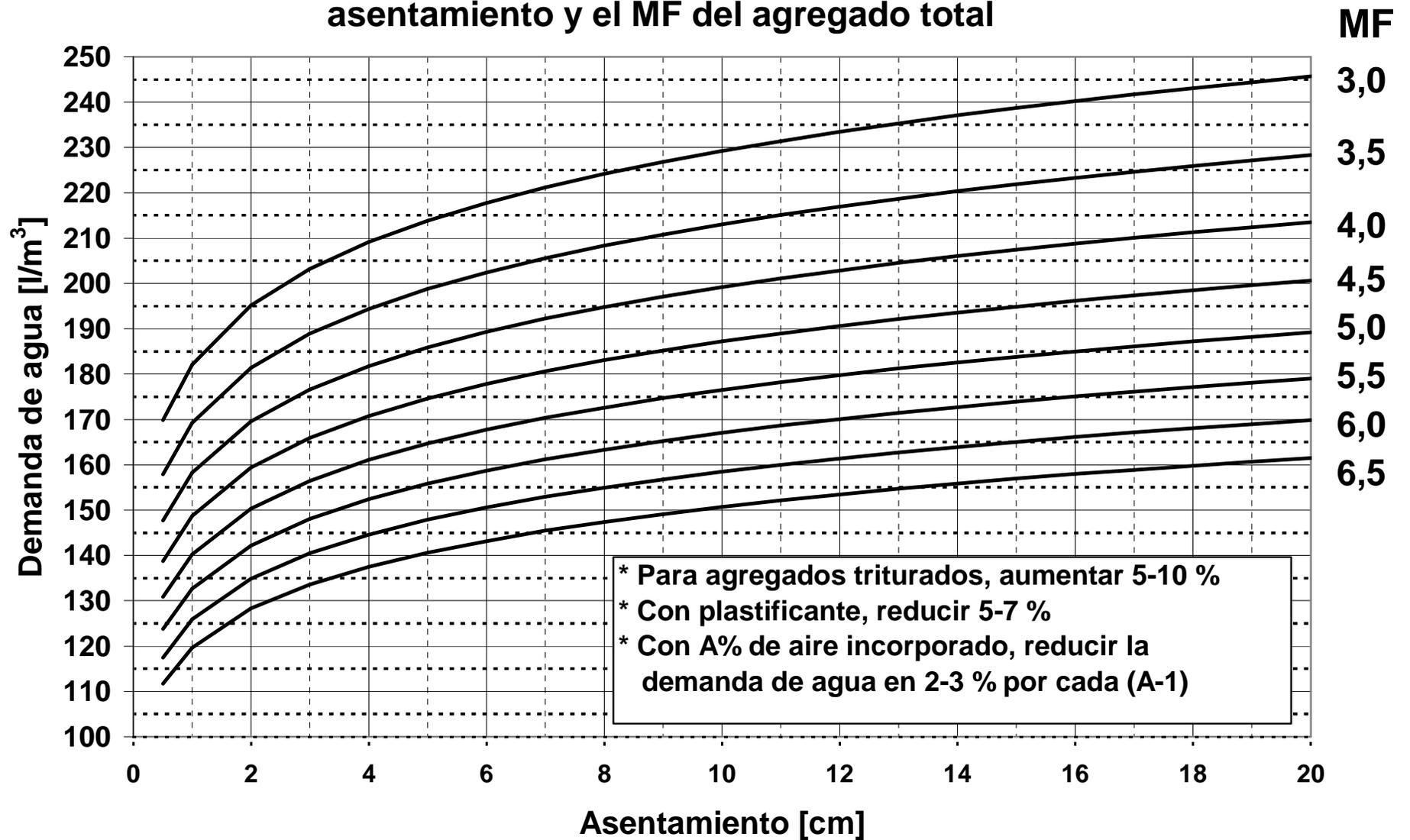
2-g. Control de calidad en obra para ajustar los valores adoptados en el desarrollo analítico del diseño de la mezcla (dispersión, resistencia media, etc.).

Una vez iniciada la obra, deben emplearse los resultados de ensayos de control de calidad en estado fresco y endurecido para reajustar en procesos sucesivos las proporciones de la mezcla, ya que se dispondrá de datos propios, obviamente más ajustados que las estimaciones adoptadas previamente en el desarrollo del método analítico.

Si las resistencias obtenidas demuestran que la mezcla es mejor de lo esperado, es posible reducir los costos mediante una disminución en el contenido de cemento, aunque debe tenerse presente las limitaciones por razones de durabilidad.

Un control de calidad eficiente permite reducir las dispersiones, lo que se traduce en la posibilidad de lograr reducción de costos adicionales, dado que para un cierto valor de resistencia especificada, la resistencia media de diseño necesaria disminuye a medida que baja la dispersión de valores.

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



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

