

Efectos de la calidad del agua en la resistencia del concreto

Este es el segundo proyecto de una serie que estudia los "Efectos de la calidad del agua en la resistencia del concreto". En el primer proyecto se analizan los efectos producidos por diferentes concentraciones de sulfatos, sólidos disueltos y materia orgánica en el agua de mezcla, sobre la resistencia y manejabilidad del concreto. En esta segunda parte se estudia únicamente el efecto del sulfato de magnesio en un rango de concentraciones en el agua de mezcla de 600 a 1.200 mg/lit. con variación de 100 mg/lit en las concentraciones, según la recomendación dada en la primera parte.

CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ F.
Ingeniero Civil
HERNAN RAMIRO SALAZAR RODRIGUEZ
JORGE E. ESCOBAR M.
LUIS A. OVALLE C.

CONSIDERACIONES GENERALES Cemento Portland

La materia prima utilizada en la fabricación del cemento Portland consiste principalmente en cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con excepción de un pequeño residuo de cal no combinada que no ha tenido tiempo suficiente para reaccionar.

Los principales componentes son:

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abrev.	Contenido medio del C.P. Tipo I
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	48%
Silicato bicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	27%
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	12%
Aluminoferrito tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF C ₄ AF	8% 8%

Para la anotación abreviada se utiliza: CaO: C; SiO: S; Al₂O₃: A, y Fe₂O₃:F. Análogamente: H₂O: H.

Hidratación

En las primeras 24 horas de mezclado con el agua, el cemento sufre una hidratación selectiva. Los principales hidratos que se forman son: hidrato de silicato de calcio e hidrato de aluminato tricálcico y una fase amorfa, probablemente CaO.Fe₂O₃ en la solución sólida del hidrato de aluminato tricálcico.

Hidrato de aluminato tricálcico y la acción del yeso

La reacción del aluminato tricálcico (C₃A) puro con agua es muy rápida y produce un inmediato endurecimiento de la pasta, conocido como "fraguado relámpago". Para prevenir esto, se agrega yeso (CaSO₄.H₂O) al clinker del cemento. El yeso y el C₃A reaccionan para formar un sulfoaluminato de calcio insoluble (etringita o 3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.3H₂O). Sin embargo, se forma a veces un hidrato de aluminato tricálcico, aunque es probable que vaya precedido por un 3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.12H₂O, metaestable, producido a expensas del

sulfoaluminato de calcio con un contenido de sulfato que existía originalmente. Al llegar más C_3A a la solución, la composición cambia y decrece continuamente el contenido de sulfato. La velocidad de reacción del C_3A es alta y si este reajuste en la composición no es suficientemente rápido, es posible que se produzca la hidratación directa del C_3A .

La cantidad de yeso añadido al clinker del cemento debe vigilarse cuidadosamente; en particular un exceso de yeso lleva a una expansión y al rompimiento consecuente de la pasta de cemento fraguada. También es el más frecuente causante del fenómeno conocido como "fraguado falso".

Generalmente, el máximo inmediato de la velocidad de evolución del calor, va seguido de un segundo máximo, aproximadamente después de cuatro a ocho horas de agregarle agua al cemento. Con la cantidad correcta de yeso deberá haber poco C_3A para la reacción después de haber combinado todo el yeso y ya no se presentará ningún otro máximo en la liberación de calor.

La cantidad de yeso requerida aumenta con el contenido de C_3A junto con el de álcali. Un incremento en la finura del cemento trae como efecto aumentar la cantidad de C_3A disponible a edades tempranas, lo cual eleva la cantidad de yeso necesaria.

Sanidad

Es esencial que la pasta de cemento, una vez endurecida, no sufra un gran cambio de volumen. En particular, no debe haber una expansión apreciable, la cual, bajo condiciones de esfuerzo podría ocasionar un rompimiento de la pasta de cemento endurecida. Tal expansión puede tener lugar debido a una hidratación retardada o lenta, o a otra reacción de algún compuesto presente en el cemento endurecido, particularmente cal libre, magnesia o sulfato cálcico.

Si las materias primas adicionadas al horno contienen más cal de la que puede combinarse con los óxidos acídicos, el exceso permanecerá en estado libre. Esta cal, fuertemente calcinada, se hidrata en forma muy lenta, y, puesto que la cal apagada ocupa un volumen mayor que el hidróxido de calcio original, se produce una expansión.

La cal adicionada al cemento no produce variación en volumen, debido a que se hidrata rápidamente, antes que la pasta haya fraguado. Por otra parte, la cal libre presente en el clinker se intercrystaliza con otros compuestos y solo se encuentra parcialmente expuesta al agua durante el tiempo anterior al fraguado de la pasta.

Un cemento también puede tener variaciones de volumen debidas a la presencia de MgO , el cual reacciona con el agua de una manera similar al CaO . La periclase (MgO cristalino) es perjudicialmente reactiva. El MgO presente en forma de vidrio es inofensivo.

El sulfato de calcio es el tercer compuesto capaz de causar expansión. En este caso se forma sulfoaluminato de calcio.

Debemos recordar que un hidrato de sulfato de calcio, el yeso, se adiciona al cemento para prevenir un fraguado relámpago; sin embargo, si el contenido de yeso sobrepasa la cantidad que puede reaccionar con el C_3A durante el fraguado, se presentará una expansión lenta.

Ya se conoce la reacción entre el C_3A y el yeso en los procesos de hidratación y especialmente de fraguado, con la consecuente formación de sulfoaluminato de calcio. En el cemento endurecido el aluminato de calcio hidratado puede reaccionar de manera parecida con alguna sal de sulfato que venga de fuera del concreto; el producto de la adición es el sulfoaluminato de calcio que se forma dentro de la pasta de cemento hidratado. Ya que el incremento de volumen de la fase sólida es de 227%, sobreviene una gradual desintegración del concreto.

Un segundo tipo de reacción se produce en el intercambio de bases entre el hidróxido de calcio y los sulfatos, que resulta en la formación de yeso con un incremento en la fase sólida del 124%.

Estas reacciones son conocidas como ataque por sulfatos.

CONCEPTOS ESPECIFICOS

Resistencia química

Para conocer la resistencia química de los elementos del hormigón, se debe conocer la composición, propiedades, así como la marcha de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento de los cementos.

En relación con esto se debe saber:

1. La evolución de las propiedades de la pasta de cemento endurecido precisa de un largo plazo.
2. La resistencia mecánica del hormigón varía con el tiempo.
3. La resistencia mecánica por sí sola no expresa todas las propiedades que determinan la resistencia a los agentes agresivos y la durabilidad.

Influencia de la finura de molido

La preparación de cementos con escaso contenido de C_3A no es la única posibilidad de conseguir cemento sulforresistente. La resistencia del hormigón a los agentes agresivos puede ser modificada por medios físicos, tales como el grado de finura del cemento. La extremada finura del molido es ventajosa, especialmente por el aumento de resistencia mecánica inicial obtenida; sin embargo, el incremento del agua de amasado correspondiente a la mayor finura del cemento va en perjuicio de la compacidad del hormigón. Además, si se sobrepasa un cierto límite de finura puede ser perjudicial desde el punto de vista de la resistencia mecánica a los agentes agresivos, pues la finura de molido influye en la estructura de la pasta de cemento endurecido.

La mayor cantidad de C_3A que reacciona debido a una molienda fina puede ser compensada por la adición de una mayor cantidad de yeso. Si durante la molienda en húmedo del clinker, se efectúa un riego con sulfatos, puede aumentar la finura del molido.

Por tanto, una buena resistencia a los sulfatos va convenientemente acompañada de una molienda fina, en húmedo, del clinker, con una dosis óptima de plastificantes, así como el aumento de la cantidad de yeso que se añade. Por consiguiente, la acción agresiva de los sulfatos, perjudicial en una molienda fina, puede ser contrarrestada mediante la adición de una determinada cantidad de yeso.

Los procesos de *corrosión* son pues, muy variados, dependiendo su intensidad y carácter de muchas circunstancias. Existen condiciones fundamentales, como por ejemplo, la composición mineralógica del clinker, la dosificación del cemento, la estructura de la pasta endurecida del cemento, el tipo de agente agresivo, etc.

Agua de amasado

El hidróxido de calcio que se libera durante la hidratación se combina con el ion sulfato que puede existir en el agua de amasado. Un criterio, generalmente usado en lo relativo a tolerancia de agentes que afecten negativamente la resistencia del hormigón, es el de aceptar una reducción hasta del 10% de esa resistencia; teniendo esto en cuenta, podría utilizarse un agua agresiva que produzca un descenso de un 10% en comparación con los hormigones producidos con agua potable.

Para la preparación del hormigón pueden emplearse todas las aguas potables existentes en la naturaleza y no contaminadas, incluso el agua de lluvia.

Es preciso hacer una clara distinción entre los efectos del agua de mezclado y el ataque al concreto endurecido por aguas agresivas. Algunas aguas de este último tipo pueden ser inofensivas e incluso benéficas cuando se usan en el mezclado.

Observaciones generales sobre la corrosión del hormigón

La velocidad real de la corrosión del hormigón en las obras depende de múltiples factores, aún no bien conocidos. El campo de la corrosión del hormigón es de naturaleza compleja, pudiendo atribuirse la aparición de un fenómeno determinado a la acción simultánea de varios factores, tales como las propiedades del medio agresivo, de la concentración de sus ácidos, bases o sales, como del desarrollo de la corrosión del propio hormigón, su composición mineralógica, forma de fabricación, edad, etc. Deben tenerse en cuenta los factores físicos externos que acrecientan o aminoran la acción agresiva como temperatura, presión, la quietud o movilidad del agente agresivo, su concentración, etc. Debemos distinguir entre la corrosión física, causada principalmente por desgaste mecánico, efectos de heladas, etc., y que, en general, se

designa como corrosión o disgregación, y los procesos químicos de corrosión producidos por causas químicas o físico-químicas (desagregación), sobre los que nuestra atención se dirige.

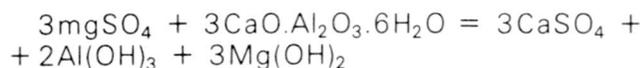
Según las reacciones químicas se pueden distinguir tres tipos clásicos de acción, que son:

1. Corrosión por lixiviación.
2. Corrosión por reacción de cambio iónico y separación de las combinaciones fácilmente solubles de la pasta de cemento, endurecida.
3. Corrosión por expansión, debida en general, a la formación de nuevos compuestos estables en la pasta de cemento, endurecida.

Corrosión por reacción de intercambio iónico:

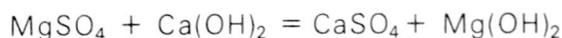
- Ion magnesio, todas las sales de magnesio, a excepción del bicarbonato, atacan al hormigón, siendo más agresivas, incluso, que el sulfato de sodio y el de calcio, pues pueden reaccionar no solo con el hidróxido cálcico sino con las restantes sales cálcicas. Todo el calcio del conglomerante existente en el hormigón puede ser sustituido progresivamente por el magnesio, lo cual produce la ruina del hormigón.

La reacción que tiene lugar es:



La corrosión provocada por el magnesio se hace visible por la destrucción de los silicatos y aluminatos cálcicos y simultáneamente por la formación de productos cristalinos de carácter indiferentes, tales como silicatos magnésicos.

El MgSO_4 actúa en forma peligrosa sobre hormigones preparados con cemento Portland y de Trass. En presencia del MgSO_4 tiene lugar la siguiente reacción:



En todas las acciones agresivas se forma en el cemento un gel, SiO_2 , y se precipita el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sobre dicho gel. De esta manera se forma el silicato magnésico, sustancia gelatinosa insoluble en agua. La corrosión producida por el magnesio causa debilitamiento en la cohesión y expansiones.

Corrosiones producidas por expansiones

La mayor parte de los procesos de corrosión causados por formación de sales, es debida a la acción agresiva de los sulfatos.

La corrosión de los sulfatos produce un aumento de volumen de la pasta de cemento, endurecida, la cual se desmorona y expande, se forman grietas y el hormigón se ablanda.

Acción de las soluciones sulfáticas sobre los distintos constituyentes del clinker

El silicato tricálcico, no es atacado directamente por el anión $(\text{SO}_4)^{-2}$, aunque sufre daños con alto contenido de C_3A , el C_3S actúa favorablemente, pues su presencia, incluso en cantidades relativa-

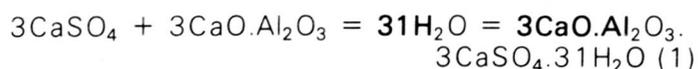
mente elevadas, causa grandes resistencias iniciales en el mortero, de forma que las soluciones agresivas no actúan tan rápidamente.

Por otra parte, no se debe considerar la corrosión solo desde el punto de vista de la capacidad de resistencia de los sulfatos, del C_3S y del C_2S , sino más bien estudiar el comportamiento del $Ca(OH)_2$ liberado por ellos durante la hidratación. Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el ion sulfato del agua con el hidróxido de calcio liberado por el cemento y que se deposita en los poros del hormigón en los que cristaliza con absorción de dos moléculas de agua. Este proceso de reacción química y cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del hormigón y termina por lograr su desmoronamiento. La cristalización del yeso viene acompañada de un aumento de volumen del 17.7%.

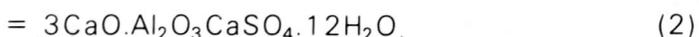
El aluminato tricálcico

Desde el punto de vista de la capacidad de resistencia de la pasta de cemento endurecida a los sulfatos, la importancia de la reacción del ion sulfato con el hidróxido de calcio ocupa un lugar secundario. La corrosión producida por los sulfatos está causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tricálcico del cemento. El C_3A reacciona con el yeso formado por el ion sulfato y el hidróxido de calcio, o con el yeso contenido en el agua selenitosa original, formándose el sulfoaluminato cálcico hidratado, de gran complejidad y poco soluble, que cristaliza absorbiendo 31 moléculas de agua y creando fuertes presiones internas a causa de su aumento de volumen. Esta sal compleja es la etringita que se forma para determinados valores de pH.

Según E. Candlot, el proceso químico es el siguiente:



y con pH diferentes:



La fórmula química del segundo miembro de la ecuación (1), representa el trisulfatoaluminato tricálcico hidratado (en abreviatura: trisulfato). La segunda combinación, el sulfoaluminato tricálcico hidratado (llamado monosulfato).

La sal compleja obtenida en la reacción (1) cristaliza en las soluciones saturadas en forma de cristales aciculares (bacilos del cemento) formados con absorción del agua de cristalización, que aumentan el volumen de tal forma que el hormigón se desmorona debido a la fuerte expansión desarrollada. El sulfato de magnesio es especialmente agresivo, debido a la acción simultánea del magnesio y de los sulfatos.

La concentración de una disolución de sulfato de magnesio influye sobre el tipo de proceso corrosivo que se produce en el hormigón. Los procesos físico-químicos son muy diversos. Existen tres procesos que dependen de la concentración de la solución de sulfato de magnesio:

1. Corrosión por el ion sulfato.
2. Corrosión sulfoaluminica selenitosa (corrosión simultánea con el magnesio).
3. Corrosión producida por el magnesio.

Los límites de los tres casos no pueden ser determinados con exactitud y dependen, entre otros factores, de la constitución mineralógica del clinker.

La marcha del proceso de corrosión magnésica es más rápida que la corrosión sulfoaluminica; el hormigón conserva su dureza normal pero se hincha y, posteriormente, se desmorona.

PROGRAMA DE ENSAYOS

Para obtener resultados comparables con los de la Tesis de Grado "Efectos de la calidad del agua en la resistencia del concreto (Parte I)", se realizó el mismo diseño de la mezcla con el que se esperaba obtener una resistencia a la compresión, a los 28 días, de 210 Kg/cm² y un asentamiento inicial de 2 1/2" de acuerdo con el criterio granulométrico de Fuller.

La calidad del agua de mezcla fue alterada

Porcentajes de reducción de la resistencia para las diferentes concentraciones de sulfatos en el agua de mezcla con respecto a la testigo.

Ensayo	Edad [días]	600 ppm		700 ppm		800 ppm		900 ppm		1.000 ppm		1100 ppm		1200 ppm		
		Mezcla test Resistencia K/c ²	%	Resistencia K/c ²	%	Resistencia K/c ²	%									
Compresión	3	100	86	14	81	19	92	8	91	91	9	93	7	96	4	
	7	199	169	15.0	167	16	164	17.6	167	16.1	164	17.6	177	11.	196	1.5
	28	300	271	9.7	264	12	261	13	266	11.3	273	9.0	279	7.0	287	4.3
	100	364	331	9.1	324	11	334	8.2	302	17	295	18.9	303	16.8	340	6.6
Tens. indirect.	28	26	25.7	1.2	24.1	7.3	22.0	15.4	23.9	8.1	25.2	3.1	24.24	6.8	25.4	2.3
Tens. viguet.	28	35	32	8.6	31	11.4	30	14.	34		32	8.6	33	5.7	35	0
Asentamiento [cm]		6.3	5.8		5.7		5.4		5.1		4.5		3.8		3.6	

variando el contenido de sulfatos. Se partió de una concentración de 600 ppm. con incrementos de 100 ppm. hasta alcanzar 1.200 ppm. Se realizó también una mezcla testigo con agua del acueducto de Bogotá. En todos los casos se mantuvo constante la relación agua-cemento (A/C) y se midió, para cada caso, la variación del asentamiento.

Se ensayaron cilindros por compresión a edades de 3, 7, 28 y 100 días, otros a tensión indirecta a los 28 días y viguetas de flexión, de 28 días de edad.

ANALISIS DE RESULTADOS

Todas las probetas se fabricaron con cemento Portland tipo I. Los resultados de resistencia por compresión y por tensión indirecta y asentamientos contra concentración de sulfatos se graficaron resultando líneas curvas cóncavas, que para cada edad mencionada describen el mismo comportamiento, reduciéndose la resistencia, tanto por compresión como por tensión, hasta cerca de 900 ppm, donde se presenta el mínimo valor y luego para las concentraciones mayores, la resistencia se incrementó sin llegar a superar la de la mezcla testigo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La pérdida de resistencia por compresión del 10% se presentó para una concentración de 600 ppm. a los 28 días. La rapidez de ataque del sulfato aumentó al elevarse la concentración de la solución, pero más allá de una concentración alrededor de 900 ppm. de sulfato de magnesio, la rapidez con que aumentó la intensidad del ataque fue menor.

La pérdida de resistencia del 10% en tensión en viguetas ocurrió para la concentración de 700 ppm.

La disminución del 10% en el asentamiento se encontró para 600 y 700 ppm.

Combinando estos conceptos, se confirma el valor dado como máximo permisible por la Norma IRAM, de 600 ppm.

Se puede concluir que este límite máximo dado por la Norma, es un valor razonable y conservativo, que tiene en cuenta los efectos que se pueden producir, tanto en las resistencias por compresión y por tensión como en el asentamiento.

La química del cemento y las reacciones involucradas por la acción de los sulfatos son muy importantes para esclarecer el mecanismo de ataque. El contenido de yeso, según las reacciones químicas que produce el sulfato de magnesio, aumenta, con el subsiguiente peligro de formación de sulfoaluminato cálcico hidratado, cuya expansión destruye el concreto endurecido.

La corrosión provocada por el magnesio se hace visible por la destrucción de los silicatos y aluminatos cálcicos y simultáneamente por la formación de productos cristalinos de carácter indiferente, tales como silicatos magnésicos.

La mayor parte de los procesos anteriores produce

una progresiva destrucción del hormigón. Sin embargo, las investigaciones demuestran la existencia de casos singulares, en los que el hormigón, a causa de la acción de un agua agresiva ha sufrido una acción curativa, es decir, una acción reforzadora de sus propiedades.

Este hecho se presentó en este proyecto, pues aunque inicialmente la resistencia disminuyó al aumentar el contenido de sulfatos, como se esperaba, para las concentraciones más altas de 900 a 1.200 ppm. hubo un incremento relativo en la resistencia tendiendo a alcanzar los valores obtenidos para la mezcla hecha con agua sin sulfatos. Este aumento de la resistencia, probablemente se debe al llenado de los huecos del hormigón por los cristales que elevan el peso específico de éste, pues la compacidad es mayor.

Puede ocurrir:

1. Que al obstaculizarse la tendencia al crecimiento y la expansión de los cristales, los esfuerzos internos resultantes destruyan el concreto, sumándose así la corrosión física a la química y que la acción de los sulfatos, en estas últimas probetas, se produzca con el paso del tiempo, pues la iniciación de los procesos de corrosión o el desarrollo de ésta puede requerir de varios años. Esto se traduciría en una menor durabilidad del hormigón.

2. Que esta resistencia permanezca, y por tanto, el uso de aguas con estas concentraciones sea aceptable, desde el punto de vista de pérdida de resistencia, pero se recomienda hacer mayor número de ensayos, pues no hay una base estadística que confirme esta aseveración. Además, desde el punto de vista de la manejabilidad, estas concentraciones son completamente inconvenientes.

Una molienda gruesa deja parte de aluminato activo sin reaccionar, y si, por cualquier causa, el proceso de hidratación continúa, los aluminatos anhidros reaccionan, lo mismo que el yeso, formando sulfoaluminatos, produciendo la destrucción del hormigón. El primer síntoma de este fenómeno es que la resistencia a tracción deja de aumentar (incluso puede disminuir), mientras que la resistencia a compresión tiene solo una correspondencia pequeña con la rotura que se produce más tarde.

Se recomienda para proyectos posteriores se analice el cambio de estos parámetros ensayando probetas a varias edades en las resistencias por tensión.

Por el contrario, una molienda fina del cemento aumenta la superficie activa del C_3A , formándose durante la hidratación una mayor cantidad de etringita, que en ese momento no causa corrosión alguna, ya que se forma en la fase plástica del hormigón.

El curado continuo que sufrieron las probetas causa aumento en el volumen y peso, debido a que el gel de cemento absorbe agua, que produce una presión de expansión, disminuye la tensión superficial y produce expansión.

Se recomienda ensayar cilindros curados conforme a las normas y luego expuestos a las condiciones ambientales, para simular las condiciones reales a que estará sometido el concreto.

Se debe usar una dosificación elevada de cemento pues, aunque parte del cemento quede inutilizada por la acción de los sulfatos, la parte restante puede desarrollar las resistencias mecánicas necesarias.

Presentamos recomendaciones teóricas de aplicación práctica que sugerimos se investiguen en proyectos posteriores:

1. La acción del CaSO_4 en el cemento hidratado disminuye al reducirse la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Fe}_2\text{O}_3$, pues se forman soluciones sólidas susceptibles de un ataque relativamente pequeño. Se recomienda agregar Fe_2O_3 a la mezcla, de modo que el contenido de C_4AF aumente a costa del C_3A .
2. No utilizar acelerantes, especialmente el cloruro de calcio que reduce la resistencia del cemento al ataque de los sulfatos, pues la fase plástica del concreto es favorable para las reacciones de los sulfatos, disminuyendo su acción nociva después de endurecido el hormigón.
3. Investigar la influencia de utilizar escoria de alto horno como estabilizador pues, según H. Lossier, capta lentamente el sulfato de calcio y pone fin a la expansión.
4. Adicionar de un 0.5 a un 1.0% de carbonato bórico al agua de amasado en mezcla total y homogénea, pues impide la formación de sulfoaluminato cálcico hidratado, ya que el ion sulfato se separa en forma de sulfato bórico y ejerce una acción compactadora y este sulfato no es nocivo para el concreto. La acción del ion magnesio no es modificada. El exceso de carbonato bórico no es dañino.
5. En las obras grandes, en las que existe un gran consumo de agua, es obligatorio examinar las que sean sospechosas, antes de su empleo, comprobando su capacidad de utilización mediante ensayos de laboratorio.

El asentamiento puede tomarse como criterio para averiguar si el contenido de sulfatos es alto, pues la influencia de éstos en dicho parámetro es inversamente proporcional. Este criterio es también aplicable a obras que no requieren grandes volúmenes de hormigón. También puede prepararse en el lugar de la obra una torta de cemento, utilizando el agua

que se ensaya. Si esta torta se comporta igual que la de contraste preparada con agua potable, puede considerarse apta el agua en cuestión, pero siempre es mejor y conveniente hacer ensayos previos.

Si se desea, o es necesario eliminar dudas sobre la calidad del agua para el amasado, deben fabricarse probetas empleando dicha agua y comprobar sus resistencias mecánicas a los 28 días, comparándolas con probetas hechas con agua potable.

Se puede obtener una rápida información del comportamiento del cemento ante los sulfatos, sólo con analizar los porcentajes de los componentes del clinker, datos que pueden suministrar los fabricantes, o ensayos químicos de laboratorio.

Se recomienda que se realicen ensayos en los que varíen las características de la mezcla, como la relación A/C, granulometría, curado de las probetas, etc.

Es un sistema largo y dispendioso: requiere de muchos ensayos, pero es necesario para lograr un completo conocimiento del proceso, para calcular la velocidad de corrosión del hormigón en función, tanto de la concentración de los sulfatos en el agua de mezcla, como de la composición del cemento, partiendo de resultados de laboratorio; ya que generalizar estos partiendo de este proyecto solamente, puede conducir a conclusiones erróneas. Además, es necesario reunir gran cantidad de observaciones "in situ" sobre obras civiles que se realicen con aguas sulfatadas.

Además, para lograr que los resultados de los distintos ensayos y laboratorios sean comparables, deben incluirse los siguientes datos en el informe de cada ensayo:

Tipo, fabricante y región del cemento empleado; porcentaje de los minerales constituyentes.

Grado de finura del molido. (Blaine o Wagner).

Calidad y cantidad de árido (tamaño máximo, granulometría, etc.).

Dimensiones de las probetas.

Datos sobre volumen de poros.

Método de curado y su tiempo. Duración de la inmersión de las probetas en agua y en condiciones ambientales, temperatura, resultados de ensayos, composición mineralógica del agregado, forma de compactación y resultados de la misma.

Otros.