

el uso del cemento aluminoso en estructuras

Report de una Comisión de la Institution of Structural Engineers de Londres

índice

Introducción.

Parte I. Características físicas y químicas de los cementos aluminosos y sus hormigones.

1. Fabricación.
2. Composición química.
3. Propiedades físicas.
4. Química de la hidratación.
5. Propiedades físicas de morteros y hormigones.
6. Efecto del calor y la humedad sobre el hormigón de cemento aluminoso.
7. Resistencia química del hormigón de cemento aluminoso.
8. Conclusiones.

Parte II. El empleo del hormigón de cemento aluminoso en edificación y trabajos estructurales.

1. Amasado.
2. Puesta en obra.
3. Curado.
4. Aridos.
5. Protección del acero de armaduras.
6. Tensiones.
7. Aditivos.
8. Aplicación.
9. Resumen.

Apéndice. Necesidad de posteriores investigaciones.

Referencias.

agradecimiento

La comunicación sobre cemento aluminoso se publicó por la Institution of Structural Engineers de Londres en 1964. Dicha Institución mantiene los derechos de autor de este informe, que aquí reproducimos con el consentimiento del Consejo de la misma.

introducción

Un comité nombrado por la Institution of Structural Engineers para estudiar el empleo práctico del cemento aluminoso y dar una guía en su uso, ha estudiado todos los datos publicados y el material disponible que refieren casos en que el cemento aluminoso se ha empleado como elemento estructural y en ingeniería civil.

Existe una experiencia amplia para demostrar que este cemento puede emplearse satisfactoriamente para producir un hormigón estable y duradero siempre que se tomen precauciones adecuadas durante el amasado, puesta en obra y curado, y se dé la debida importancia a las condiciones de temperatura y humedad a que puede estar posteriormente sometido.

Debe destacarse la importancia de un curado efectivo del hormigón de cemento aluminoso durante las primeras edades del endurecimiento, particularmente, durante las primeras 24 horas después del amasado. Si la temperatura del hormigón no se conserva lo suficientemente baja durante los 2 ó 3 primeros días, la conversión de ciertos productos de la hidratación de una a otra forma puede ser tan rápida como para dañar la resistencia del hormigón. La consiguiente pérdida en la resistencia final puede variar desde 5 a 70 % o más, según la relación agua/cemento empleada durante el amasado. Estos factores son de vital importancia cuando se emplea cemento aluminoso, debiéndose recalcar que este cemento es un material de construcción totalmente distinto del cemento portland.

El hormigón preparado con cemento aluminoso y áridos de los empleados normalmente en edificación e ingeniería estructural, es de endurecimiento extremadamente rápido. El tiempo de fraguado varía con las condiciones, pero, por término medio, es quizás más lento si se compara con el hormigón de cemento portland. Sin embargo, una vez que se inicia el fraguado del cemento aluminoso, su resistencia se desarrolla rápidamente.

El hormigón de cemento aluminoso tiene una resistencia elevada al ataque químico, tales como el de los sulfatos en suelos y también el de un buen número de productos industriales (1). El grado de resistencia depende de circunstancias individuales; pero en todos los casos es esencial un hormigón compactado densamente, prestando especial atención a los efectos ventajosos de una baja relación agua/cemento.

Empleado con áridos adecuados, el cemento aluminoso puede producir un hormigón refractario que dará buenos servicios hasta temperaturas de 1.800°C, aunque este trabajo no tratará de este aspecto particular en el empleo del cemento.

Se han estudiado muchos trabajos relacionados con el fracaso parcial o total debido a la pérdida de resistencia o durabilidad del hormigón hecho con cemento aluminoso, pérdidas que se han atribuido a la "conversión", incluyendo los trabajos citados por Neville (2). Por desgracia, en muchos casos no se dispone de información detallada disponible en cuanto a las precauciones tomadas durante el amasado y curado para reducir los efectos de la conver-

sión. Por lo tanto, es posible, al menos en algunos casos, que las proporciones de mezcla y las condiciones de curado fueran tales que agravasen desfavorablemente los efectos de la conversión.

Este trabajo trata de las características de fraguado y endurecimiento del hormigón de cemento aluminoso. La primera parte expone las propiedades físicas y químicas del cemento aluminoso y de los hormigones hechos con este cemento. La segunda se refiere al amasado, puesta en obra y curado del hormigón de cemento aluminoso y de su uso en edificación y estructuras; también se señalan las consecuencias en su mal empleo.

De este trabajo se deduce asimismo que la fabricación de este tipo de conglomerante no está normalizada en todos los países. Las recomendaciones aquí señaladas se refieren sólo al cemento aluminoso fabricado en la Gran Bretaña.

Las tensiones que deben emplearse en los hormigones de cemento aluminoso se consideran materia de los Códigos de buena práctica que tratan con las tensiones y criterios de proyecto en el hormigón para estructuras.

PARTE I

características físicas y químicas del cemento aluminoso y sus hormigones

La finalidad de esta primera parte es resumir brevemente las propiedades físicas y químicas que deben tenerse en cuenta cuando se emplea el cemento aluminoso en hormigón para estructuras. El término "cemento aluminoso" se aplica a aquellos conglomerantes hidráulicos, cuyo principal compuesto conglomerante es el aluminato monocálcico. Tal cemento se obtiene por reacción conjunta a altas temperaturas de una mezcla de materias primas calizas y aluminosas, con posterior enfriamiento y molienda. En Gran Bretaña, las materias primas son, generalmente, caliza y bauxita, y el cemento se define y especifica por la norma BS 915 (3).

Las características más importantes del cemento aluminoso son: su gran velocidad en el desarrollo de resistencias, su resistencia al ataque por sulfatos y ácidos diluidos, y su aptitud para formar hormigón refractario capaz de soportar altas temperaturas. Sin embargo, como en este trabajo se trata de cubrir solamente los empleos en estructuras normales, no se considerarán los hormigones refractarios. Se han hecho referencia a trabajos publicados (4) e inéditos llevados a cabo por la Building Research Station, así como a los libros de Lea (1) y Robson (5), los cuales deben consultarse para poseer una información más detallada.

1. fabricación

El método de fabricación varía de unos países a otros. En Rusia se fabrica un cemento AG, que consiste en cemento aluminoso y yeso, pero que no tiene las propiedades normales del cemento aluminoso. En Alemania se fabrica el cemento aluminoso en hornos vertica-

les y el cemento resultante tiene un contenido en azufre anormalmente elevado. En Gran Bretaña, el cemento aluminoso se prepara por fusión de bauxita y caliza en un horno de reverbero en condiciones controladas.

Los datos y recomendaciones que aquí se presentan se refieren al cemento aluminoso fabricado en Gran Bretaña.

2. composición química

El análisis químico del cemento aluminoso demuestra que consta de combinaciones de cal, alúmina, sílice y óxidos de hierro, junto con otros constituyentes menores, en cantidades que varían entre los siguientes límites porcentuales: CaO 36-42; Al₂O₃ 38-51; SiO₂ 3,5-9,0; Fe₂O₃ 0-14; FeO 0-8; MgO 0,1-1,4; TiO₂ 1,5-2,0; azufre como sulfuro 0-1,0; SO₃ 0-0,5; álcalis totales 0,2-0,6. Los valores más altos para azufre y SO₃ se refieren a los cementos fabricados a partir de escoria de horno alto. Como su nombre lleva consigo, el cemento aluminoso contiene una mayor proporción de alúmina que el cemento portland y cantidades menores de cal y sílice.

Todos estos óxidos se combinan en el cemento para formar varios compuestos minerales (silicatos y aluminatos anhidros). Para simplificar la discusión de compuestos anhidros e hidratados es costumbre emplear fórmulas abreviadas, en las que: CaO = C; Al₂O₃ = A; SiO₂ = S; Fe₂O₃ = F, y H₂O = H. Así CA, representa CaO.Al₂O₃, aluminato monocálcico.

La constitución del cemento aluminoso no está tan bien establecida como la del cemento portland. Sin embargo, se sabe que los constituyentes del cemento aluminoso normal son CA, CA₂, C₂AS y C₂S. Entre ellos el CA es, con mucho, el más importante, y la mayor parte de las propiedades del cemento aluminoso se reproducen en un cemento sintético hecho sólo de aluminato monocálcico puro (CA). Poco se sabe todavía de los compuestos de hierro y otro compuesto "fibroso" que se supone, como idea más generalizada, que contiene cal, alúmina, sílice y óxido ferroso.

3. propiedades físicas

El cemento aluminoso fabricado en Gran Bretaña es gris oscuro, casi negro, en su color, pero los cementos extranjeros pueden variar desde un gris muy claro a negro. No obstante, la calidad no lleva consigo relación alguna con el color, el cual es función de la cantidad y grado de oxidación de los compuestos de hierro presentes. El peso específico varía entre 3,00 y 3,25 y además se controla en gran medida por el contenido en hierro. El cemento inglés tiene normalmente un peso específico de 3,20-3,25.

Es razonable suponer una densidad aparente de 1,44 kg/l, pero como con todos los cementos pueden obtenerse valores comprendidos entre 1,12 y 1,74 kg/l, según el método aplicado para llenar la medida.

El residuo máximo permitido por la BS 915 sobre un tamiz British Standard n.º 170 es 8 %, obteniéndose normalmente valores comprendidos entre 2 y 6 %. La superficie específica medida por el método de la British Standard puede variar entre 2.500 y 4.000 cm²/g, comparado con un BS 915 mínimo de 2.250 cm²/gramo.

Normalmente existe una ligera expansión del cemento aluminoso en su fraguado bajo agua, pero no se conocen expansiones perniciosas tal como ocurren con el cemento portland. La expansión máxima permitida por la BS 915 en el ensayo de Le Chatelier es 1 mm, pero este ensayo tiene poco valor.

4. química de la hidratación

La acción del agua sobre los constituyentes anhidros del cemento conduce a la formación de compuestos hidratados y al consiguiente fraguado y endurecimiento. A temperaturas ordinarias, la reacción más importante es la formación de aluminato monocálcico hidratado (CAH_{10}). Además, si el cemento anhidro tiene un exceso de alúmina (Al_2O_3) se formará algo de gel de alúmina, que a la vez cristalizará como gibbsita (AH_3), mientras que si hay un exceso de cal (CaO) es de esperar algo de C_2AH_8 . La sílice combina con la cal para formar silicato cálcico hidratado, lo mismo que ocurre en el cemento portland. Poco se sabe sobre las reacciones de los compuestos de hierro, aunque se supone que sean de poca importancia. En presencia de álcalis, que pueden derivarse del cemento, de los áridos o de otra fuente externa, se formará C_2AH_8 a expensas del CAH_{10} . Debe señalarse que, en contraste con el cemento portland, no se forma hidróxido cálcico a temperaturas normales en cualesquiera circunstancias, lo cual es una razón para la resistencia del cemento aluminoso al ataque de sulfatos y ácidos diluidos. Sin embargo, si al cemento aluminoso se añade cal, bien en forma de cal apagada o combinada como cemento portland, se forma rápidamente C_2AH_8 , resultando un fraguado muy rápido y una resistencia final reducida.

Los compuestos hidratados CAH_{10} y C_2AH_8 cristalizan en el sistema hexagonal y se suelen designar colectivamente como "aluminatos hexagonales". A temperaturas próximas a 20°C son metaestables en contacto con el agua y tienden a transformarse gradualmente en el compuesto estable C_3AH_6 y alúmina en forma de gel o gibbsita (AH_3). El compuesto C_3AH_6 cristaliza en el sistema cúbico y se conoce con el nombre de "aluminato cúbico".

Como los pesos específicos de estos compuestos son:

CAH_{10}	1,72	C_3AH_6	2,53
C_2AH_8	1,95	AH_3	2,44

se ve inmediatamente que la reacción de conversión, regida por la ecuación $3\text{CAH}_{10} = \text{C}_3\text{AH}_6 + 2\text{AH}_3 + 18\text{H}$, produce una considerable reducción en el volumen de los productos sólidos. Puesto que el conjunto de dimensiones de las piezas permanece esencialmente constante, la conversión de aluminatos hexagonales a cúbicos debe provocar un considerable aumento en la porosidad.

5. propiedades físicas de morteros y hormigones

Por las diferencias inherentes en la consistencia de las pastas de cemento, el cemento aluminoso, para las mismas proporciones de mezcla, da una masa más dócil que el cemento portland. Esta diferencia es más pronunciada en relaciones agua/cemento bajas. Así, con relaciones agua/cemento de 0,30-0,35, el factor de compactación es 10-15 % mayor que para el cemento portland con la misma relación agua/cemento; el efecto disminuye apreciablemente a medida que aumenta la relación agua/cemento.

Los tiempos de fraguado determinados por el método de la British Standard son ligeramente más largos que para el cemento portland, y en contraste con los cementos portland son prolongados por una moderada elevación de la temperatura.

Como con otros cementos, las resistencias a compresión y flexión del hormigón del cemento aluminoso, adecuadamente preparado y curado, aumenta con la edad y disminuye al elevar la relación agua/cemento. En la tabla 1 se dan las resistencias normales a distintas edades para cubos de 10 cm de lado y probetas de flexión de $25 \times 10 \times 10$ cm, para un hormigón nominal 1:2:4, curado en aire húmedo a una temperatura standard y relaciones

agua/cemento de 0,4, 0,5 y 0,6. En la tabla 2 se muestran las resistencias normales para diferentes relaciones agua/cemento a una edad de 7 días, mostrándose la disminución de resistencia al aumentar la relación agua/cemento.

La expansión de morteros y hormigones durante su conservación bajo agua y su retracción por conservación al aire son del mismo orden que los obtenidos con mezclas similares de hormigón de cemento portland.

TABLA 1
VELOCIDAD EN EL DESARROLLO DE RESISTENCIA EN LOS HORMIGONES DE CEMENTO ALUMINOSO

EDAD	Resistencia a compresión (kg/cm ²)			Resistencia a flexión (Módulo de rotura) (kg/cm ²)			
	Relación agua/cemento	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4
6 horas		140	175	210	12	16	18
12 horas		390	440	490	30	34	37
18 horas		460	525	600	34	39	43
24 horas		490	560	630	37	41	45
3 días		580	650	705	42	46	49
7 días		630	705	755	45	49	52
28 días		670	740	790	47	51	54
90 días		705	775	825	49	53	56

TABLA 2
RESISTENCIA DEL HORMIGON DE CEMENTO ALUMINOSO A 7 DIAS

Relación agua/cemento	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a flexión (kg/cm ²)
0,35	775	53
0,40	755	52
0,45	740	51
0,50	705	49
0,55	670	47
0,60	630	45

En la tabla 3 se dan las temperaturas alcanzadas en mezclas similares hechas con cemento aluminoso y cemento portland ordinario y conservadas sin pérdida de calor. La hidratación más rápida del cemento aluminoso conduce a desarrollar el calor en un periodo de tiempo más corto que el que tiene lugar en el caso del cemento portland.

TABLA 3
ELEVACION DE TEMPERATURA EN EL HORMIGON DE CEMENTO ALUMINOSO

EDAD	Elevación de temperatura (°C)	
	Cemento aluminoso	Cemento portland ordinario
12 horas	36	8
24 horas	42	14
3 días	45	22

6. efecto del calor y la humedad sobre el hormigón de cemento aluminoso endurecido

Se sabe desde hace mucho que el mortero u hormigón de cemento aluminoso, cuando se expone durante algún período de su vida al calor en condiciones húmedas, sufre cambios físicos y químicos que conducen en algunas circunstancias a un marcado descenso en su resistencia. Hoy día se considera generalmente que la causa de esta pérdida de resistencia es la conversión de los aluminatos hexagonales a los aluminatos cúbicos más estables químicamente.

El factor que influye en mayor escala en la resistencia del hormigón de cemento aluminoso después de la conversión es la relación agua/cemento de la mezcla, como se muestra en la tabla 4, que compara la resistencia del hormigón totalmente convertido con el hormigón curado a temperatura standard durante 1 día. La conversión se produjo rápidamente conservando las probetas en agua a 38°C, inmediatamente después de moldeadas.

TABLA 4
EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO SOBRE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON DE CEMENTO ALUMINOSO

Relación agua/cemento	Resistencia a la compresión, kg/cm ²		
	A 1 día a 19° C	B 6 días a 38° C	B expresado como porcentaje de A
0,35	670	505	74
0,40	640	400	62
0,45	600	315	53
0,50	550	245	45
0,55	500	195	39
0,60	450	155	34

Puede demostrarse que la conversión de la condición metaestable a la estable en presencia de agua es un ejemplo de un proceso de reacción química, es decir, la reacción procede a una velocidad que varía exponencialmente con la temperatura. El camino más sencillo para expresar esto es estimar el tiempo requerido a cualquier temperatura para que la reacción química haya recorrido la mitad del camino, como se muestra en la tabla 5, que se basa sobre un trabajo inédito de la Building Research Station. Debe tenerse en cuenta que el cambio de resistencia no es necesariamente proporcional al grado de conversión química.

TABLA 5
ENSAYOS QUIMICOS SOBRE CEMENTO ALUMINOSO EN PASTA PURA Y UNA RELACION AGUA/CEMENTO DE 0,26

Tiempo requerido para la semi-conversión (Conservación en condiciones de humedad)	Temperatura (°C)
30 años	18
10 años	23
1 año	33
90 días	40
28 días	45
7 días	52
3 días	55
1 día	60

Como puede verse en esta tabla, a temperatura normal, la reacción transcurrirá en su mitad en un período de 10-20 años. Aunque algunos ensayos de laboratorio muestran que la resistencia de un hormigón 1:6 con una relación agua/cemento de 0,60 puede haber empezado a disminuir en este período, la cantidad es pequeña y, en ningún caso, proporcional al grado de transformación química que ha tenido lugar.

La velocidad y extensión de la conversión se afectan en gran medida por la presencia de humedad. La conversión de pequeñas muestras de laboratorio es mucho más lenta en aire con una humedad normal que en agua y puede cesar totalmente en aire completamente seco, independientemente de la temperatura. No obstante, debe recordarse que el agua no se difundirá fácilmente a través de una probeta de hormigón de buena calidad y, en consecuencia, la masa de hormigón de cemento aluminoso sufrirá la conversión incluso con calor seco. La velocidad de conversión se afecta también por la madurez del hormigón, reduciéndose considerablemente si la probeta de hormigón se almacena en agua a temperatura ambiente antes de exponerla a las condiciones que favorecen la conversión.

Debe señalarse que la conversión no va invariablemente acompañada de una caída en la resistencia. El hormigón de cemento aluminoso expuesto al efecto del agua de mar como parte de la investigación de la Institution of Civil Engineers, mostró por examen mineralógico haber sufrido casi una conversión completa al cabo de unos 30 años. Sin embargo, el hormigón convertido aún mantuvo su resistencia original y ha resistido la acción de agua de mar. Por lo tanto, parece que la conversión puede no resultar en una disminución de resistencia si la reacción se ha producido con bastante lentitud.

Se ha supuesto que la causa de la pérdida de resistencia es el aumento de porosidad que experimenta cuando tiene lugar la conversión. Aunque las complicaciones experimentales hacen difícil de probar esto de un modo concluyente, existen algunas indicaciones de que el hormigón cuya conversión ha tenido lugar en decenas de años no es tan poroso como aquel en que la conversión ha sido rápida. Parece que el menor descenso de resistencia que tiene lugar en mezclas con bajas relaciones agua/cemento o con lentas velocidades de conversión se debe a la porosidad inherente resultante de la conversión, la cual se rellena gradualmente por nuevos productos de hidratación. Hasta el momento hay poca evidencia experimental para justificar esta teoría.

7. resistencia química del hormigón de cemento aluminoso

El hormigón de cemento aluminoso de buena calidad es muy resistente al ataque por sulfatos y ácidos débiles contenidos en las aguas terrestres o resultantes de procesos industriales. La resistencia continuada a tales acciones requiere que el hormigón sea denso e impermeable. Por lo tanto, la resistencia del hormigón que tiene una relación agua/cemento alta y que ha sufrido rápidamente la conversión, quedará notablemente reducida. Parece que las masas con baja relación agua/cemento que han sufrido la conversión retienen en mayor grado su resistencia química, aunque se dispone de poca información sobre este asunto.

El hormigón de cemento aluminoso está expuesto al deslavado y a la desintegración si se expone continuamente al efecto de soluciones alcalinas. Aunque en circunstancias normales el hormigón de cemento portland puede enlazarse con el hormigón de cemento aluminoso y viceversa, en condiciones de exposición al agua pueden transferirse álcalis del hormigón de cemento portland al hormigón de cemento aluminoso, con resultados perjudiciales.

8. conclusiones

Se considera que la conversión de los aluminatos hexagonales a los aluminatos cúbicos de mayor estabilidad química, que puede conducir a una disminución en las resistencias mecánica y química, está gobernada por un proceso de velocidad de reacción química, el cual ocurre sólo en presencia de agua, bien procedente del exterior o bien retenida en la masa de hormigón. Los métodos para atenuar los efectos perniciosos de la conversión son:

a) reducir la porosidad del hormigón empleando una relación agua/cemento baja y que en algunos casos nunca debe exceder de 0,5 (ver parte II, sección 1);

b) disminuir la velocidad de reacción, conservando el hormigón de cemento aluminoso seco después de un curado inicial adecuado y a baja temperatura.

PARTE II

el empleo del hormigón de cemento aluminoso en edificación y trabajos estructurales

1. amasado

Para reducir al máximo los posibles efectos de la "conversión" debe adoptarse una relación agua/cemento baja. No debe ser mayor de 0,5 para hormigón armado, ni mayor de 0,4 para hormigón pretensado, aunque no puede sobreacentuarse en la importancia de exceder estos valores.

El agua utilizada para amasar el hormigón de cemento aluminoso debe estar limpia y libre de materias perniciosas. No debe emplearse agua de mar.

2. puesta en obra

El hormigón de cemento aluminoso debe compactarse perfectamente para producir una masa densa, de modo que la porosidad y la permeabilidad se conserven en un mínimo.

Para evitar las altas temperaturas que se desarrollan en el hormigón por el calor de hidratación, deben tomarse medidas en el control de temperatura durante el curado. Si el hormigón tiene mucho espesor o se coloca a gran profundidad, no puede llevarse a cabo este control aun cuando se separen pronto los encofrados y se aplique un enfriamiento con agua.

Durante el curado del hormigón de cemento aluminoso, la elevación de temperatura crece al aumentar el contenido de cemento; por lo tanto, los espesores de cualquier hormigón recientemente colocado deben ser tanto menores cuanto mayor es el contenido de cemento. En tales casos, es conveniente buscar el consejo de los fabricantes de cemento.

En la práctica se ha encontrado que no deben colocarse tongadas de más de 30 cm de espesor para mezclas normales de hormigón (300 kg/m³ de hormigón de cemento aluminoso) y las sucesivas deben colocarse a intervalos de 24 horas por lo menos, dejándose enfriar total y continuamente cada una de ellas. Un pilar o una pared, es decir, unos 60 cm de espesor, pueden moldearse a cualquier profundidad de tongada, siempre que el encofrado lateral pueda retirarse rápidamente en todos sus costados y enfriarse todas las caras con agua.

La tongada en mezclas más ricas de lo normal siempre deben de ser inferiores a 30 cm, excepto en el caso de pilares y paredes, tal como referíamos anteriormente.

Si, por cualquier razón, el espesor de un elemento constructivo o la profundidad de tongada debe ser mayor que el mínimo necesario para la buena disipación del calor, entonces debe disponerse algún sistema de refrigeración interna, tales como tubos metálicos distanciados unos 30 cm en sus ejes y conectados a una fuente de suministro de agua.

El encofrado metálico disipa el calor más rápidamente que el de madera.

3. curado

Siempre es importante disipar el calor retirando el encofrado lo más pronto que sea posible (que normalmente puede ser de 2 a 6 horas después de la puesta en obra, dependiendo de las condiciones), regar inmediatamente con agua fría y continuar conservando el hormigón completamente húmedo, al menos 1 día completo.

Con objeto de reducir al mínimo los efectos de la conversión, es deseable que la temperatura máxima en un hormigón endurecido nunca debe exceder de unos 60°C y las temperaturas superiores a 25°C deben disiparse lo más rápidamente posible, para asegurar que en todos los casos la temperatura es inferior a 25°C al final de las primeras 24 horas. La temperatura debe mantenerse por debajo de este nivel durante los 3 ó 4 días siguientes si se quieren evitar los peligrosos efectos del sobrecalentamiento. Estas condiciones se llevan a cabo normalmente en la práctica del hormigonado en climas templados, si se cumplen las recomendaciones dadas anteriormente sobre amasado, puesta en obra y curado.

Puesto que la temperatura de la mezcla original es aditiva a la elevación de temperatura debida a la hidratación, es difícil amasar y colocar satisfactoriamente el hormigón de cemento aluminoso en climas cálidos.

Los principios para el hormigonado en tiempo frío con cemento aluminoso pueden resumirse como sigue:

- a) la temperatura de la mezcla antes de su colocación sólo debe ser lo suficientemente alta para permanecer sobre 0°C de 2 a 3 horas, es decir, hasta que arranca la hidratación y el desarrollo de calor. En secciones delgadas en climas extremados puede ser necesario asegurar una temperatura de mezcla inicial de hasta 20°C en la primera fase de la hidratación, aunque sería peligroso calentar la mezcla por encima de 25°C;
- b) no deben de utilizarse materiales congelados;
- c) no debe emplearse cloruro cálcico.

El curado con vapor del hormigón de cemento aluminoso provocará una rápida conversión, y, en circunstancias normales no debe emplearse.

4. áridos

En general, con las excepciones dadas más adelante, para la confección de hormigones de cemento aluminoso no refractarios pueden utilizarse cualquiera de los áridos considerados como buenos para su empleo con cemento Portland y que cumplan con la correspondiente British Standard.

Ciertas rocas ígneas pueden liberar álcalis en la mezcla, y este fenómeno es pernicioso en el caso del cemento aluminoso. No todas las rocas ígneas liberan álcalis con la misma extensión, y la mayor parte de los álcalis liberados proceden de la porción más finamente dividida del árido. Por lo tanto, es prudente no usar las porciones más finamente divididas de tales rocas ígneas.

No existen referencias de deterioros debidos a los áridos del hormigón de cemento aluminoso si se emplean escorias, siempre que su uso quede limitado al árido grueso. No puede recomendarse el empleo de escoria para el árido fino. Este árido finamente dividido puede producir retrasos en el fraguado y endurecimiento, los cuales aumentan con la finura; a su vez, las dispersiones en la composición química de dicho árido fino pueden también conducir a ciertas perturbaciones.

5. protección del acero de armaduras

El acero embebido en el hormigón se protege contra la corrosión atmosférica de dos maneras: (1) previniendo que el hormigón sea suficientemente compacto y cubriendo bien las armaduras para impedir el acceso de aire y agua al acero y (2) protegiendo al acero químicamente por la naturaleza alcalina del hormigón.

El hormigón de cemento aluminoso no es tan alcalino como el hormigón de cemento portland, pero, en circunstancias normales, todavía es lo suficientemente alcalino para proteger el acero. En todos los tipos de hormigón, la absorción de anhídrido carbónico del aire hace el hormigón menos alcalino y el acero más asequible de corroerse. Con el cemento aluminoso en particular es importante evitar mezclas de relación agua/cemento elevada, puesto que estos hormigones, una vez que han sufrido la conversión, serán porosos y factibles de una fácil carbonatación,

Si el cemento aluminoso del tipo fabricado en Gran Bretaña se emplea según las recomendaciones señaladas, la experiencia ha demostrado que la corrosión del acero es despreciable.

Donde se empleen alambres pretensados, deben cumplir los requisitos de la CP 115. No debe utilizarse alambre que esté sometido a corrosión tensional o efectos quebradizos por hidrógeno. Algunos alambres tratados con calor y templados, empleados en el Continente, han creado problemas de este tipo. El tratamiento con calor para templar y normalizar el alambre estirado en frío producido en Inglaterra, no desarrolla apreciablemente estos efectos perniciosos.

6. tensiones

El problema de qué tensiones pueden aplicarse en el uso del hormigón de cemento aluminoso es extremadamente complejo, dependiendo de muchos factores que están fuera del control directo del proyectista.

Las tensiones permisibles no están dentro de los términos de referencia del presente Comité. Deben de estar de acuerdo con las recomendaciones de las normas pertinentes, donde se hace referencia específica a las tensiones permisibles para el hormigón de cemento aluminoso.

Hay pocos datos para dar referencias sobre el efecto de la conversión sobre la fluencia y elasticidad del hormigón de cemento aluminoso.

7. aditivos

No deben emplearse aditivos con el cemento aluminoso sin hacer referencia a los fabricantes de cemento.

Los aceleradores de fraguado pueden aumentar la resistencia en las primeras edades, pero las resistencias posteriores se afectan normalmente de modo adverso. Algunos retardadores producen una resistencia final más alta. Muchos agentes plastificantes conducen a una mejor docilidad del hormigón, pero lleva consigo una reducción de resistencia.

8. aplicación

El hormigón de cemento aluminoso puede usarse con toda garantía para elementos con carga de una estructura, supuesto que se han tomado las precauciones señaladas en la parte II, secciones 1-3.

El hormigón de cemento aluminoso no debe utilizarse en una estructura que soporte carga en condiciones tropicales o en estructuras industriales donde se someterá a calor y humedad, ya que puede tener lugar la total conversión si el hormigón, incluso bien curado, se mantiene posteriormente bajo agua o en condiciones saturadas a temperaturas superiores a 25-30°C.

El hormigón de cemento aluminoso puede también emplearse ventajosamente donde los esfuerzos no son críticos, pero aun en tales casos se recomienda una relación agua/cemento baja, junto con una buena compactación.

9. resumen

Para reducir los efectos de la conversión, deben observarse los siguientes principios generales:

(1) Debe emplearse una relación agua/cemento baja (nunca superior a 0,50). (Ver también Parte II, Sección 1).

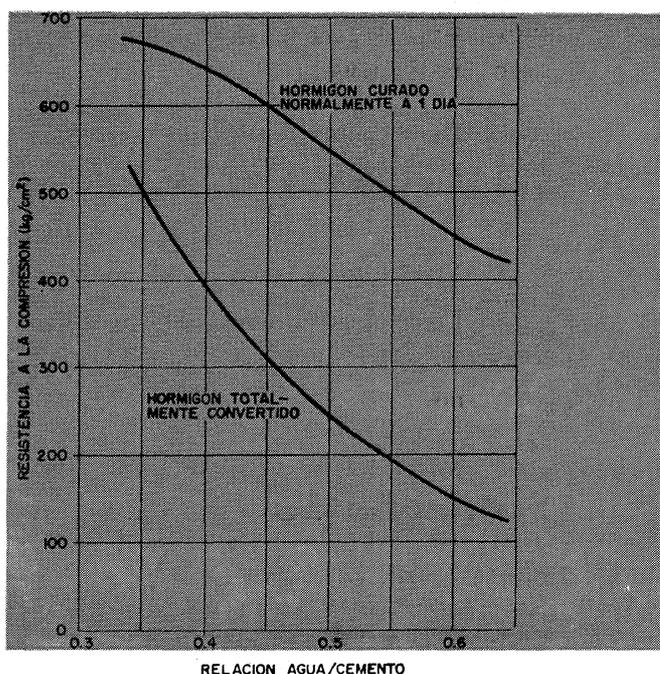


Fig. 1

Comparación de las resistencias de cubos a 1 día y después de la conversión total, para distintas relaciones agua/cemento.

(2) Debe aplicarse pronto y de modo persistente un enfriamiento para ayudar a disipar el calor debido a la hidratación.

(3) Debe aplicarse una adecuada compactación para obtener la máxima densidad. Esto reducirá la porosidad y aumentará la impermeabilidad.

(4) Si no se toman adecuadas precauciones para reducir al máximo una rápida conversión, la resistencia debe basarse sobre una conversión total. La figura 1 (basada en la tabla 4) muestra los valores comparativos de la resistencia de cubos a 1 día y después de la total conversión para varias relaciones agua/cemento. Estos valores no son mínimos absolutos, pero representan el orden de valores mínimos que probablemente ocurran en la práctica.

APENDICE

necesidad de posteriores investigaciones

Un cierto número de aspectos del cemento aluminoso requieren nuevas investigaciones. Entre éstas son de particular importancia en el uso de los hormigones del cemento aluminoso, las siguientes:

1. Resistencia química del hormigón totalmente convertido.
2. Conversión en condiciones de servicio, es decir, bajo carga.
3. Propiedades elásticas del hormigón no convertido.
4. Efecto de la conversión sobre la elasticidad y la fluencia.
5. Ensayos para detectar la pérdida de resistencia debida a la conversión.
6. Resistencia al fuego de los elementos estructurales de hormigón de cemento aluminoso.

referencias

1. LEA, F. M.: *The Chemistry of Cement and Concrete*. 2nd edition. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd. 1956, p. 426.
2. NEVILLE, A. M.: "A Study of Deterioration of Structural Concrete Made with High-Alumina Cement". Proc. Inst. Civil Eng., Vol. 25, July 1963, p. 287; discussion, Vol. 28, May 1964, p. 57.
3. *British Standards Institution*. High-Alumina Cement. BS 915: 1947.
4. *Building Research Station*. High-Alumina Cement. BRS Digest, núm. 27. HMSO. 1951.
5. ROBSON, T. D.: High-Alumina Cements and Concretes. London: Contractors Record Ltd. 1962.
6. LEA, F. M. and WATKINS, C. M.: The Durability of Reinforced Concrete in Sea Water. 20th Report of the Sea Action Committee of the Institution of Civil Engineers. National Building Studies Research Paper, núm. 30. HMSO. 1960.