Hormigón de cemento aluminoso: durabilidad y conversión

Un nuevo punto de vista sobre un tema antiguo

Calcium aluminate cement concrete: durability and conversion A fresh look at an old subject

C. M. GEORGE, Lafarge Fondu International R. G. J. MONTGOMERY, Lafarge Coppee Recherche

Fecha de recepción: 28-V-92.

RESUMEN

Este trabajo examina de nuevo la relación entre durabilidad y conversión de hormigones de cemento aluminoso, HAC (High Alumina Cement).

La conversión es un proceso natural e inevitable a través del cual este material consigue una condición definitiva y astable

Numerosas estructuras que se edificaron hace más de medio siglo siguen utilizables y utilizadas hoy en día. Algunas de estas estructuras vienen ilustradas en este trabajo. Ellas sirven como mejor ejemplo de la durabilidad del hormigón convertido, ya que han sobrevivido mucho más tiempo en el estado convertido que en el no convertido.

Las singulares características de rápido endurecimiento del HAC ofrecen una valiosa capacidad de auto-calentamiento. La conversión es inmediata y esto lleva a mejores resistencias a largo plazo porque el cemento se hidrata más. Asimismo, trabajos recientes han demostrado que los hidratos de CA convertidos, termodinámicamente estables, son intrínsecamente más resistentes al ataque de agentes tan agresivos como ácido sultúrico. Esto explica el excelente comportamiento a largo plazo de hormigones Fondu, por ejemplo en muchas aplicaciones en alcantarilla.

Nuestros conocimientos y comprensión hoy en día de la durabilidad de los cementos aluminosos se basa en casi 100 años de experiencia acumulada y estudios en laboratorio. Sabemos cómo utilizar estos materiales y sabemos qué esperar de ellos. Podemos estar seguros que nos servirán bien en el siglo próximo.

SUMMARY

This paper re-examines the relationship between durability and conversion of calcium aluminate cement concretes, CACC.

Conversión is a natural and inevitable process whereby these materials reach a stable mature condition.

Numerous structures built more than half a century ago remain serviceable and in service today. Some of these are illustrated. They are the best testament to the durability of converted concrete having survived far longer in the converted than the unconverted condition.

The unique rapid hardening characteristics of CACC offer a valuable selfheating capability. Conversion is immediate and this leads to better long term strengths because more cement is hydrated. Moreover, recent work has shown that the termodynamically stable hydrates of converted CAC are intrinsically more resistant to attack from such aggressive agents as sulphuric acid. This provides an explanation of the excellent long term performance of Fondu concretes, for example in many saewer applications.

Our knowledge and understanding today of the durability of calcium aluminate bonded materials has been built on close to 100 years of accumulated experience and laboratory studies. We know how to use these materials and we know what to expect from them. We can be confident that they will serve us well in the century ahead.

Estamos viviendo la última década del siglo veinte y si nos queremos preparar para el siglo 21 va siendo hora que examinemos el estatus del hormigón de cemento aluminoso y las perspectivas para el futuro.

Se ha escrito mucho sobre este tema desde los principios de la época de Ciment Fondu, en 1908, y aquí no intentaremos dar un exhauxtivo repaso de la literatura. En cambio, nos concentraremos en conocimientos básicos y pruebas de comportamiento en práctica.

A este fin hemos elegido una selección limitada de datos de investigación y hemos centrado la atención en durabilidad que demostraron estructuras reales (en Gran Bretaña principalmente). Queremos desarrollar una interpretación revisada y modernizada del comportamiento del hormigón con cemento aluminoso.

Podemos empezar por el mismo nombre. En Gran Bretaña, el término HAC (High Alumina Cement), cemento con alto contenido de alúmina, se adoptó pronto cuando Fondu era el único cemento de este tipo disponible. Con el contenido de 40 % de Al₂O₃ desde luego tenía "alto contenido de alúmina" comparado con cemento portland. Hoy en día tenemos disponible toda una familia de cementos con contenidos de alúmina desde menos del 40 % hasta por encima del 80%. Su rasgo común, desde el punto de vista del comportamiento, es su mineralogía, con el aluminato monocálcico como la fase reactiva principal en todos ellos. Por eso preferimos y hemos adoptado cemento aluminoso (CA).

El cemento particular al que nos referimos constantemente en este trabajo es Ciment Fondu Lafarge (*), seguramente el más conocido y el más duradero de todos los cementos aluminosos industriales.

Fondu primero apareció en Francia cerca del fin de la Primera Guerra Mundial. A diferencia del cemento portland, se producía utilizando un proceso de disolución. Hoy se produce a una escala mucho más grande para satisfacer la demanda, pero el principio de la producción permanece siendo el mismo (1).

La persistencia de la composición durante tantos años es motivo de orgullo. Se pueden comparar los datos en la tabla 1.

El análisis del año 1934 era del cemento utilizado para hormigonar unas vigas de gran sección transversal para apoyar un puente grúa. Muestras de este hormigón en servicio fueron

(*) Trade name of Lafarge Fondu International.

We are now well into the closing decade of the 20th Century and as we prepare for the post 2000 era it is timely to take a look at the status of calcium aluminate cement concrete and the prospects for the future.

Much has been written on the subject since the dawn of the industrial Ciment Fondu age in 1908 and we shall not attempt a comprehensive review of the literature. Instead we shall concentrate on the essential knowledge and evidence of performance in practice.

For this purpose we have chosen a limited selection of investigative data and focused on durability as displayed by real structures (mainly in Britain). In presenting this we seek to develop a revised and up-to-date interpretation of the behaviour of calcium aluminate concrete.

Our point of departure can be with the name itself. In Britain the term HAC (High Alumina Cement) was adopted early when Fondu was the only cement of the type available. At 40 % Al₂O₃ content it was certainly "High Alumina" compared to Portland cement. Today a whole family of cements is available with alumina contents from below 40 % to above 80 %. Their common feature from a behavioural point of view is their mineralogy, monocalcium aluminate being the major reactive phase in them all. For this reason we prefer and have adopted, Calcium Aluminate Cement (CAC).

The particular CAC to which we shall constantly refer in this paper is Ciment Fondu Lafarge (*), by far the most well known and long lasting of all the industrial calcium aluminates.

Fondu first became availabe towards the end of WWI in France. Unlike Portland cement, it was manufactured by a melting process. Today it is produced on a much larger scale to keep pace with demand, but the principle of manufacture remains the same (1).

Consistency of composition over the years is a matter of some pride. Compare these records in the table 1.

The 1934 analysis was of a cement load used to cast some very large cross section beams to support a traveling crane. Samples of this concrete in service were examined some 20 years

^(*) Trade name of Lafarge Fondu International.

TABLA 1 TABLE 1
Composiciones químicas (peso %) de Ciment Fondu
[Chemical compositions (weight %) of Ciment Fondu]

Fecha de producción (Date of manufacture)							
	1934	1963-1976	1992				
Al ₂ O ₃	39.15	37.74-41.04	39.2-40.1				
CaO	38.60	36.15-38.37	38.2-38.5				
Fe₂O₃	10.85	9.74-11.99	12.8-13.3				
FeO	4.75	3.75-6.54	2.5-3.2				
SiO ₂	3.50	3.73-4.46	4.1-4.4				
TiO ₂	2.00	1.26-1.94	1.8-1.9				

TABLA 2 TABLE 2
Porosidad medida como volumen %; resistencia a compresión medida en MPa
(Porosity measured as volume %; compressive strength measured in MPa)

	Porosidades y resistencias a compresión de hormigones Ciment Fondu (2) [(Porosities and compressive strengths of ciment fondu concretes, (2)]											
	Temperatura de curado a 2 días (°C) [2-day curing temperature (°C)]											
Total w/c	10		2	0	30		50		70		90	
	V %	MPa	V %	MPa	V %	MPa	V %	MPa	V %	MPa	V %	MPa
1.0	17.9	23	19.0	23	18.5	13.5	20.0	5.5	22.6	2	22.9	2
0.67	13.4	60.5	13.8	55	15.0	50	15.7	24	18.1	9	18.0	7
0.5	11.6	70	11.7	72	12.0	67.5	12.4	32	13.5	22	15.3	29.5
0.4	9.6	81.5	9.8	77	10.8	78	12.0	55.5	11.4	34.5	14.0	34.5
0.33	9.7	91	8.8	90	11.5	88	11.4	68	12.0	46.5	12.5	55.5

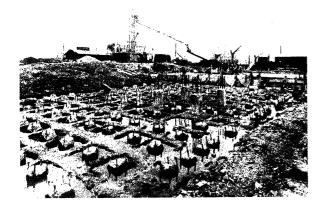


Foto 8.1.—Hormigón Fondu pilotes prefabricados (1931).

Photograph 8.1.—Fondu concrete precast piles (1931).

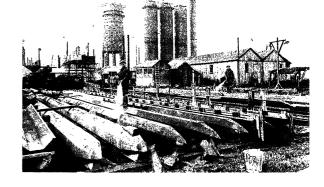


Foto 8.2.—Pilotes prefabricados de hormigón esperando instalación.

Photograph 8.2.—Precast concrete piles awaiting installation.

35

examinadas unos 20 años más tarde. El interior del hormigón estaba completamente convertido y era más poroso que la superficie. La capa superficial, de sólo 1 mm de espesor, estaba carbonatada y no había huellas evidentes de conversión. Ensayos de resistencia a compresión del hormigón interior dieron valores de 12 a 20 MPa y una porosidad asociada del orden de 20 %. Esto es compatible con un hormigón completamente convertido, con la proporción total de agua/cemento alrededor de 0,6 a 0,7. (Tabla 2).

Se usaron 8.000 toneladas de Ciment Fondu al mismo tiempo (1931) para una gran estructura de pilotes en los terrenos enlodados del estuario del Támesis. El sitio era realmente un basurero contaminado con grandes cantidades de sulfato.

La fotografía 8.1 fue sacada poco antes de que se acabara el trabajo original. La fotografía 8.2 (1929) muestra pilotes prefabricados esperando instalación. Los pilotes tenían 80 pies (24 m) largos. La fábrica que había sido construida sobre estos pilotes ha sido derribada recientemente, pero los cimientos se conservaron para un aparcamiento de coches.

En la fotografía 8.2 se puede ver que los transversales hexagonales de estos pilotes tienen un diámetro de unas 18 pulgadas (50 cm), más que suficiente para asegurar una rápida conversión a pesar de la precaución tomada de regar las superficies con agua. El examen de una muestra de 60 años, de uno de estos pilotes, confirma la conversión y la resistencia a compresión asociada de unos 20 MPa. La capa superficial demostraba una vez más tal dureza que, la fecha en que el producto se produjo y que se había grabado en su superficie hace 60 años, aún estaba claramente visible (fotografía 8.3).

Se debería explicar que la conversión es un proceso por el cual el HAC llega a una condición definitiva y estable. Cuando se utiliza Fondu, por ejemplo en secciones finas o como lechada, el calor generado en la reacción del cemento con agua no es suficiente para causar ningún aumento importante de temperatura. Lo mismo se podría decir de ejemplares pequeños curados a temperatura ambiente en el laboratorio. Bajo estas circunstancias los productos hidratados de la reacción tienen baja densidad y son sólo metaestables:

CAH₁₀,C₂AH₈

Ellos requieren una cantidad considerable de agua en su formación, más de lo que se proporciona normalmente en el amasado del hormigón: gran cantidad de cemento permanece no hidratado. Más tarde los hidratos cambian a una forma densa y permanente:

C₃AH₆, AH₃

later. The interior of the concrete was fully converted and more porous than the surface. The surface skin, only 1 mm thick, was carbonated and no trace of conversion was evident. Compressive strength tests of the interior concrete gave values from 12 to 20 MPa and an associated porosity of the order of 20 %. This is quite compatible with a fully converted concrete with a total water/cement ratio in the region of 0.6 to 0.7. (Table 2).

8,000 tons of Ciment Fondu were used at about the same period (1931) for a major piled structure in the mud flats of the Thames estuary. The site was actually a contaminated waste dump and heavily sulphated.

Photograph 8.1 was taken near completion of the original work. Photograph 8.2 (1929) shows the precast piles awaiting installation. The piles were 80 ft. (24 m) long, driven to a standstill. The factory built on these piles was demolished recently but the foundations were retained for a car park.

From photograph 8.2 it can be seen that the hexagonal cross sections of these piles are about 18 inches (50 cms) in diameter, more than enough to ensure rapid conversion despite the precaution of water spraying the surfaces. Examination of a 60 year old sample from one of these piles confirms the conversion and associated compressive strength of about 20 MPa. Furthermore, a surface skin was again apparent and of such hardness that the date of manufacture scratched in 60 years ago is still clearly evident (fotograph 8.3).

Conversion, it should be explained, is a process whereby CACC reaches a stable mature condition. When Fondu is used, for example, in thin sections or as a grout, the heat generated as the cement reacts with water is insufficient to cause any substantial rise in temperature. The same would apply to small specimens cured at room temperature in a laboratory. Under these circumstances the hydrate reaction products are of low density and only metastable:

CAH₁₀, C₂AH₈

They require a considerable amount of water for their formation, more usually than is provided in the fresh concrete mix: a lot of cement remains unhydrated. Subsequently, the hydrates change to a dense permanent form:

C3AH6, AH3



Foto 8.3.—La sección de pilotes de hormigón Fondu expuestos a marea.

Photograph 8.3.—Exposed inter tidal section of fondu concrete piles, age 60 years, 1991.

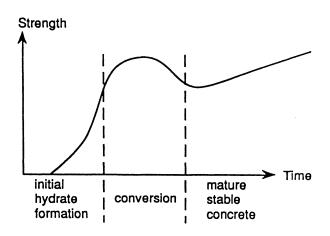


Fig. 1.—La curva esquemática del desarrollo de resistencia en hormigón Fondu utilizado en pequeñas cantidades y curado a temperatura ambiente. (Sin autocalentamiento importante).

Fig. 1.—Schematic strength development curve for fondu concrete used in small quantities and cured at room temperature. (No significant self-heating).

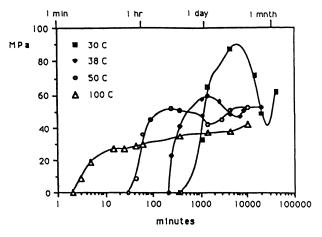


Fig. 2.—Efecto de la temperatura del curado en el desarrollo de resistencia y conversión de hormigones Fondu (a/c = 0,38).

Fig. 2.—Effect of curing temperature on strength development and conversion of fondu concretes (w/c = 0.38).

Estos hidratos contienen menos agua y la diferencia se desprende para reaccionar con el cemento residual. De esta manera el hormigón de cemento aluminoso alcanza su estado definitivo.

La curva de desarrollo de resistencia asociada con esta serie de eventos se conoce bien y es característico del HAC. (Fig. 1).

Esta situación presenta un marcado contraste comparado con el comportamiento del hormigón en gran cantidad, como por ejemplo en vigas de grúas o pilotes citados anteriormente. Aquí, mientras la superficie está normalmente curada con agua para prevenir desecación superficial, el interior se calienta rápidamente debido a la reacción de hidratación. Temperaturas de 50 a 80°C se alcanzan pronto en unas horas del proceso de hormigonar: el hormigón es mal conductor de calor. La conversión se acelera dramáticamente.

La conversión y su dependencia con la temperatura se han estudiado ampliamente. Algunos datos se pueden ver en la figura 2 (3). En la curva del desarrollo el mínimo de resistencia corresponde a la finalización del proceso de conversión. Se observa cómo a 100°C la conversión es prácticamente inmediata y no se puede detectar ningún mínimo en la resistencia.

La naturaleza y el desarrollo de hidratos se pueden identificar utilizando la difracción de rayos X, DRX. Tradicionalmente, esto se hacía reaccionando cemento y agua y deteniendo el proceso de hidratación en edades elegidas lavando las muestras con acetona/éter. Entonces, las muestras se pueden examinar tranquilamente en el difractómetro. Recientemente se ha utilizado el sincrotrono para proporcionar una fuente de radiación-x de alta intensidad para el examen de hidratos in situ mientras se están formando (4). Esto ha demostrado que, incluso a temperaturas altas (70 a 100° C), los hidratos de CAH₁₀ y C₂AH₈ aparecen antes de convertirse (muy rápidamente) en C₃AH₆/AH₃. En la figura 3 esto se puede observar.

La velocidad con que se realiza la conversión se puede seguir midiendo el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar su estabilidad y resistencia final (el punto mínimo de la figura 1). La gráfica siguiente lo ilustra muy claramente.

Las implicaciones prácticas de la conversión no siempre se han entendido del todo. Una equivocación persistente ha sido la convicción de que la conversión no ocurría a bajas temperaturas, o bien que ocurría tan lentamente que era despreciable. Este punto de vista ha recomendado el uso de bajos contenidos de cemento (para provocar un mínimo autocalentamiento) y también limitaciones en las cantidades utilizadas (una vez más para que el hormigón permanezca frío).

These hydrates contain less water and the difference is released to react with the residual cement. This is how a calcium aluminate cement concrete reaches maturity.

The strength development curve associated with this series to events is well known and unique to CACC. (Fig. 1).

This situation is in sharp contrast to the behaviour of mass concrete in practice, such as the crane beams and piles cited aerlier. Here, while the surface is normally water cured to prevent superficial desiccation, the interior heats up rapidly due to the hydration reaction.

Temperatures of 50 to 80°C are readily achieved within a few hours of casting - concrete is a poor conductor of heat. Conversion is dramatically accelerated.

Conversion and its dependence on temperature has been widely studied. Some good data is shown in figure 2, (3). The minima in the strength development curves correspond to completion of the conversion process. Note that at 100°C, conversion is virtually immediate and no minima in strength can be detected.

The nature and development of hydrates can be identified using X-ray diffraction, XRD.

Traditionally, this has been done by reacting cement and water and arresting the hydration process at chosen ages by washing samples in acetone/ether. The samples can then be examined in the diffractometer at leisure. Recently the synchrotron has been used to provide a high intensity x-radiation source for in-situ examination of hydrates as they are being formed, (4). This has demonstrated that even at high temperatures (70 to 100°C), the CAH₁₀ and C₂AH₈ hydrates appear first before being converted (extremely rapidly) to C₂AH₆/AH₃. Figure 3 illustrates this.

The rate at which conversion takes place can be followed by measuring the time taken for a concrete to reach its stable, mature, strength (the minimum point in figure 1). The following graph illustrates this very clearly.

The practical implications of conversion have not always been thoroughly understood. A persistent misconception has been that conversion would not occur at low temperatures, or that it would occur slowly enough to be inconsequential. This view has encouraged the use of low cement contents (to minimize self heating) and limitations on depth of pour (again to keep the concrete cool).

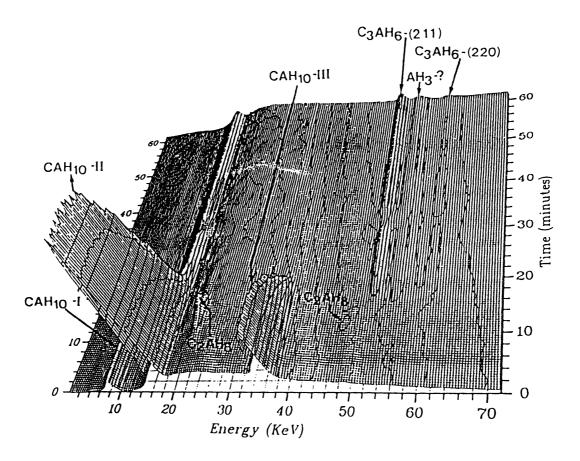


Fig. 3.—Datos de sincrotrono que muestran rápida conversión a 70°C.

Fig. 3.—Synchrotron data showing rapid conversion at 70°C.

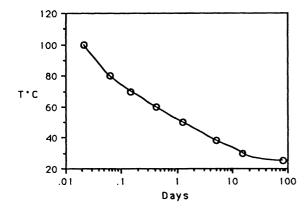


Fig. 4.—Velocidad de conversión (edad al mímimo resistencia) en función de temperatura del curado (3).

Fig. 4.—Rate of conversión (age at minimum strength) as a function of curing temperature (3).

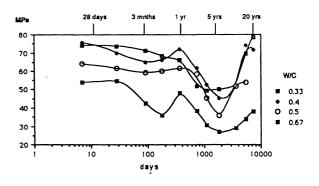


Fig. 5.—Resistencia de hormigones Fondu mantenidos al aire libre mostrando resistencias mínimas a largo plazo asociadas con la conversión alcanzada después de 5 años.

Fig. 5.—Strength of fondu concretes stored outdoors showing minimun long term strengths associated with conversion are reached after 5 years.

Pruebas a largo plazo han demostrado, sin lugar a dudas, que la conversión **siempre** ocurre (figura 5) y que las características del hormigón maduro no dependen críticamente de la velocidad del proceso. El factor clave es la cantidad de agua y cemento utilizados en la preparación del hormigón. La proporción de agua/cemento debería mantenerse baja (≤ 0,4), cerca de la cantidad requerida para hidratar el cemento completamente a C₃AH₆ y AH₃, y el contenido del cemento debería ser suficientemente alto (≥ 400 kg/m³) para proporcionar fluidez suficiente para una adecuada trabajabilidad.

Estos requisitos se han incluido en varias especificaciones, siendo las más recientes Afnor Standard NFP15-315 y P15-316, en abril de 1991, y que se están estudiando actualmente para elaborar una Norma Europea.

La figura 6 ilustra la influencia de la relación a/c en la resistencia de hormigones Fondu maduros (20 años de edad) —gráfica reproducida de la referencia (5)—.

Sin embargo, veinte años son mucho tiempo de espera para pruebas de durabilidad. Se necesita un método de predicción del comportamiento a largo plazo. Se ha comprobado, ampliamente, un ensayo acelerado que necesita tan sólo unos días.

La mínima resistencia asociada con la conversión de hormigón Fondu a 38°C (históricamente, se ha elegido esta temperatura para pruebas a largo plazo porque corresponde a 100 grados en la escala de Farhenheit y a la temperatura superior esperada en un clima como el de Gran Bretaña) ocurre después de 3 meses, cuando el curado de hormigón se inicia a 20°C. (Tabla 3).

La misma resistencia mínima se puede medir mucho más rápidamente si el curado se efectúa directamente a 38°C, como se ve en la tabla 4.

Esta prueba se ha utilizado para controlar la calidad de Ciment Fondu industrial durante muchos años. La figura 7 (1) muestra algunos resultados recientes.

En las figuras 8 y 9 se demuestra la manera en que el contenido de cemento influye en la trabajabilidad o la docilidad de hormigón Fondu.

Según las recomendaciones actuales para una buena calidad, el hormigón completamente compactado requiere un mínimo de contenido de cemento de 400 kg/m³, y esa necesidad se ve en las gráficas. Mayores cantidades no tienen utilidad práctica si se utiliza cemento suficiente (figura 10).

Long term tests have now demostrated unequivocally that conversion **always** occurs (see figure 5) and that the properties of the mature concrete are not critically dependent on how fast or slowly the process occurs. The key factor is the amount of water and cement used in preparing the concrete. The ratio of water to cement should be kept low (\leq 0.4), close to the amount needed to fully hydrate the cement to C_3AH_6 and AH_3 , and the cement content should be high enough (\geq 400 kg/m³) to provide sufficient flow for effective placeability.

These requirements have been built into various specifications, most recently the Afnor Standard NFP15-315, and P15-316, April 1991, and these are now being considered for a European Standard.

Figure 6 illustrates clearly the impact of w/c on the strength of mature (20 year old) Fondu concretes, [replotted from reference (5)].

Twenty years, however, is a long time to wait for evidence of longevity or durability. Some method of predicting long-term performance is desirable. An accelerated test which takes only a few days has been amply established.

The minimum strength associated with conversion of Fondu concrete at 38°C (historically this temperate was chosen for long date tests because it corresponds to 100 degrees on the Fahrenheit scale and to the upper temperature expected in a temperature climate such as that of Britain) occurs after 3 months when the concrete is cured initially at 20°C. (Table 3).

This same minimum strength can be measured much more rapidly by curing directly at 38°C, as the following comparison shows in the table 4.

This test has been used to monitor the quality of industrial Ciment Fondu for many years. Some recent results are given in figure 7 (1).

The way in which cement content allows the workability of flow characteristics of Fondu concrete to be adjusted in displayed in figures 8 and 9.

Current recommendations for good quality, fully compacted concrete require a minimum cement content of 400 kg/m³ and the need for this is apparent in the graphs. That being said, provided enough cement is used no usefull purpose is served by higher levels. See figure 10.

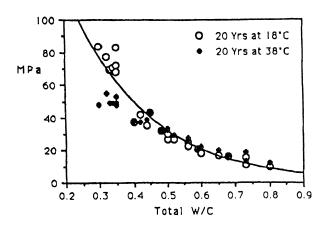


Fig. 6.—Efecto de a/c en la resistencia de hormigón Fondu.

Fig. 6.—Effect of w/c on strength of mature fondu concrete.

TABLA 3 TABLE 3
Resistencias a compresión como porcentaje de resistencia a los 3 meses (Compressive strength as a percentage of strength at 3 months)

0.35 207 164 100 106 110 118 120 0.40 263 153 100 111 121 136 143 0.45 271 204 100 110 124 — 16	Total	Días ((Days)	Meses (Months)		Años (Years)		
0.40 263 153 100 111 121 136 143 0.45 271 204 100 110 124 — 16	w/c	7	28	3	12	5	10	20
0.45 271 204 100 110 124 — 16	0.35	207	164	100	106	110	118	120
	0.40	263	153	100	111	121	136	142
0.50 357 197 100 110 127 192 160	0.45	271	204	100	110	124		161
	0.50	357	197	100	110	127	192	166
	0.60	356	146	100	103	123	_	147

TABLA 4 TABLE 4
Datos de 7 muestras diferentes de Ciment Fondu
(Data on 7 different samples of Ciment Fondu)

Resistencia a compresión, MPa (6) [Compressive strengty, MPa (6)]									
Total		s a 38°C s at 38°C)	1 día a 20°C + 3 meses a 38°C (1 day at 20°C + 3 months at 38°C)						
w/c	Promedio (Average)	Desviación estándar (Standard Deviation)	Promedio (Average)	Desviación estándar (Standard Deviation)					
0.35	46.4	3.6	49.8	5.9					
0.40	39.5	1.9	37.5	4.0					
0.50	22.2	1.6	21.9	4.0					

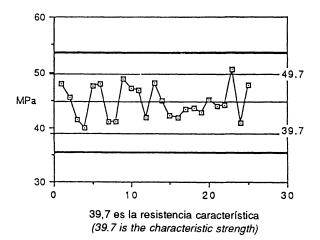


Fig. 7—Resistencias mínimas (5 días) de hormigón Fondu curado sumergido en agua a 38°C. W/C = 0,4. Muestras seleccionadas al azar para control mensual de calidad.

Fig. 7.—Minimum (5 day) strengths of fondu concrete cured under water at $38^{\circ}C$. W/C=0.4. Random monthly quality assurance samples.

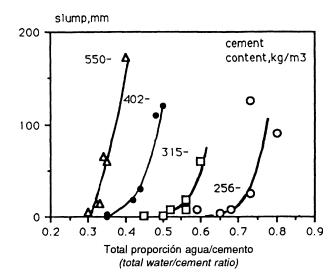
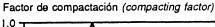


Fig. 8.—Asiento de hormigones Fondu en función de contenido de cemento y a/c (5).

Fig. 8.—Slump of fondu concretes as function of cement content and w/c (5).



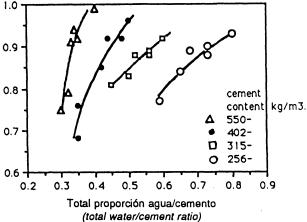
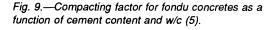


Fig. 9.—Factor de compactación para hormigones Fondu en función de contenido de cemento y a/c (5).



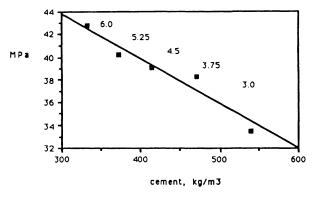


Fig. 10.—Efecto del contenido de cemento sobre la resistencia con a/c constante (0,4). (Números por encima de los puntos indican proporciones de árido/cemento). (6).

Fig. 10.—The effect of cement content on strength at constant w/c (0.4). (Numbers above points are aggregate/cement ratios). (6).

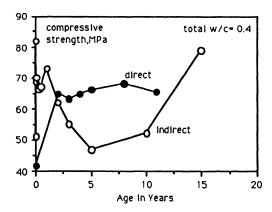
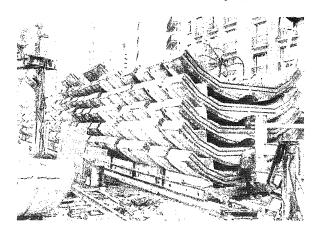


Fig. 11.—Resistencia desarrollada por hidratación directa e indirecta.

Fig. 11.—Strength development by direct and indirect hydration.





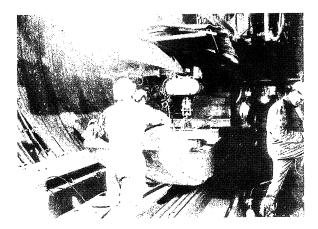


Foto 5 (Photograph 5)

Una excelente demostración práctica de la ventaja de conseguir conversión directa durante el proceso de curado se ofrece en unos trabajos realizados en los años 50. Dos probetas de gran sección se hormigonaron con la misma mezcla: uno regado con agua para mantener la humedad en la superficie, el otro refrigerado internamente pasando agua fría por los tubos de acero encerrados en el hormigón. Como podemos predecir ahora con seguridad, el hormigón refrigerado internamente pasó por el ciclo de desarrollo de resistencia como en figura 1. alcanzando "madurez" en unos 5 años. El hormigón con auto-calentamiento demostró mejores características. El promedio de la resistencia del hormigón internamente refrigerado después de 5 años fue de 44,7 MPa, mientras que la del hormigón con auto-calentamiento fue de 54,0 MPa. Este comportamiento está representado en la figura 11.

De las capacidades de auto-calentamiento de hormigón Fondu se sacó buen partido en 1975. Las dovelas [fotos 4 (especialmente el primer plano) y 5] se hormigonaron de la mezcla preparada del hormigón Fondu, y luego se desenmoldaron al cabo de unas horas para reemplazar el producto que iba originalmente a realizarse sólo con OPC. En estas grandes piezas, que pesaban más de 2 t cada una, la conversión fue directa mientras se curaban a causa de la hirdatación interna desarrollada por el calor. Cuando se pudieron utilizar, estas dos unidades se colocaron en el túnel donde han permanecido hasta hoy. No se han realizado, pues no se han considerado necesarios, registros que pudieran identificar qué dovelas son de Fondu y cuáles se hicieron de hormigón con cemento portland. El cliente confiaba, y sigue confiando, en la seguridad a largo plazo del hormigón de Ciment Fondu hecho correctamente.

An excellent practical demonstration of the advantage of achieving conversion directly during the curing process is provided by some work carried out in the 1950's. Two sets of large section concrete were cast from the same mix, one water sprayed to contain surface moisture, the other cooled internally by passing cold water through steel pipes encased in the concrete. As we may now confidently predict, the internally cooled concrete went through a strength development cycle as in figure 1 reaching maturity after about 5 years. The self-heated concretes performed better. The average strength of the internally cooled concrete after 5 years was 44.7 MPa, whereas, that of the self-heated concrete was 54.0 MPa. This behaviour is typified by figure 11.

The self-heating capabilities of Fondu concrete were put to good advantage in 1975. The voussoris (photographs 4, and especially the close-up, 5) were cast from ready-mix Fondu concrete and demoulded within a few hours to supplement production originally intended to be carried out only with OPC. These massive castings, weighing over 2 tons each, converted directly as they cured form the internal hydration heat developed. Placed in the tunnel as they became available, these units remain in place today. No records have been kept, indeed no records have been considered necessary, identifying in the tunnel lining which voussoirs are in Fondu and which are in Portland cement concrete. The customer was, and remains, confident of the long term reliability of properly made Ciment Fondu concrete.

Los argumentos y observaciones que hemos dado aquí nos llevan a la conclusión de que la conversión en sí, que fue el centro de atención en el pasado, no es en realidad un efecto negativo que se debería aplazar si fuera posible, sino un proceso inevitable a través del cual materiales CA alcanzan su estado estable permanente. Además, como se acaba de ver, aplazando el proceso no se saca ninguna ventaja.

Otra ventaja de la conversión temprana se puede encontrar en el estudio de la resistencia a la corrosión de los hormigones Fondu. Podemos analizar el ejemplo del ataque de ácido sulfúrico (7). Cuando se compara el comportamiento de las muestras no convertida y convertida con las mismas dosificaciones iniciales, se encuentra que las muestras que se convertieron deliberadamente, antes de exponerlas al ácido, resistían mejor a pesar de su inevitable más alta porosidad. C₃AH₆ y AH₃ son termodinámicamente estables e intrínsecamente más resistentes que los hidratos metaestables CAH₁₀ y C₂AH₈. Con estos resultados es lógico el excelente largo servicio (varias décadas) de hormigones Fondu en estructuras de alcantarilla con alto contenido en ácidos.

La conclusión de que la conversión es el proceso natural hacia un estado definitivo y una estabilidad a largo plazo, ofrece una razón muy importante con la cual se entiende en seguida el porqué las estructuras de hormigón CA todavía están en servicio a edades que superan los ensayos más prolongados de longevidad.

La conversión, si no ha ocurrido ya unas horas después de la colocación, generalmente se cumplirá dentro de los 5 a 10 años en la mayoría de las condiciones reales. No son posibles más cambios de esa naturaleza, y si el hormigón fue de calidad adecuada cuando se colocó, permanecerá así.

En este artículo se presentan diversos ejemplos (que de ningún modo pueden considerarse únicos). Todas estas estructuras son tan antiguas que la conversión debe haber sido terminada hace mucho tiempo, incluso aunque no haya habido auto-calentamiento cuando se construyeron. (Foto 6).

La vista aérea con la zona de interés aparece rodeada de una línea blanca superimpresionada en la fotografía.
La condición actual de esta gran estructura (sobrevivió la II Guerra Mundial) no se ha verificado. Sin embargo, 15 años después de la construcción original, se edificó una nueva estructura encima de la primera, también con hormigón Fondu. Es un ejemplo impresionante de la excelencia de los hormigones Fondu en ambientes marinos. (Foto 7).

The arguments and observations given here condense to a common conclusion that conversion in itself, so much a focus of past attention, is not in reality an unwelcome effect to be postponed if possible, but an inevitable process by which CAC materials reach their permanent stable condition. Moreover, as we have just seen, there is no advantage in delaying the process.

Another striking illustration of the advantage of early conversion is to be found in the study of corrosion resistance of Fondu concretes. We may take the example of sulphuric acid attack, (7). When the performance of unconverted and converted test specimens is compared for the same initial mix design it is those that have been deliberately converted before exposure to acid that resist best-despite their inevitably higher porosity. C_3AH_6 and AH_3 are thermodynamically stable and intrinsically more resistant than the metastable CAH_{10} and C_2AH_8 hydrates. Consistent with these results is the excellent long service performance (many decades) of Fondu concretes in highly acidic sewer structures.

The realisation that conversion is a natural progression towards maturity and long term stability provides a much needed rationale through which the evidence of CAC concrete structures still in service at ages which far outdate the most sustained long date tests becomes readily understandable.

Conversion, if it has not already occured within hours of placing, will generally reach completion within 5 to 10 years under most in-service conditions. No further changes of a like nature are possible and if the concrete was of adequate quality when placed it will remain so.

We present here a (by no means unlimited) number of examples. All of these structures are so old today that conversion must have been long complete, even if self heating had not occurred when they were built. (Fot. 6).

This is an aerial view with the area of interest surrounded by a white line superimposed on the photograph. The present condition of this extensive structure (if it survived WW II) has not been verified. However, 15 years after the original construction, a new structure was built on top of the earlier one, also in Fondu concrete. This is a strinking example of the excellence of Fondu concretes in marine environments. (Fot. 7).

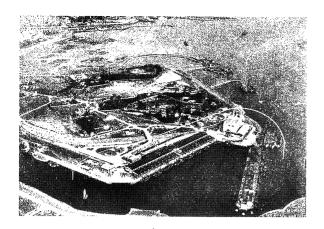


Foto 6.—1921/1936 - Puente de Lorient, Francia.

Photograph 6.—1921/1936 - Port of Lorient, France.

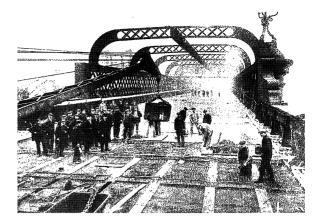


Foto 7.—1921 - Puente de ferrocarril en Glasgow, Escocia.

Photograph 7.—1921 - Glasgow railway bridge, Scotland.

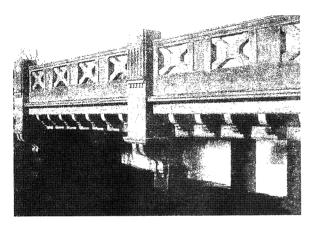


Foto 8.—1926 - Puente Fringringhoe, Essex, Reino Unido.

Photograph 8.—1926 - Fringringhoe bridge, Essex, UK.

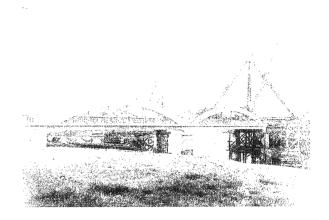


Foto 9.—1926 Puente Kirkcudbright, Escocia.

Photograph 9.—1926 - Kirkcudbright Bridge, Scotland.

Hacia el año 1930 - Malecón en Newcastle, Reino Unido. (Circa 1930 - Jetty at Newcastle, UK).

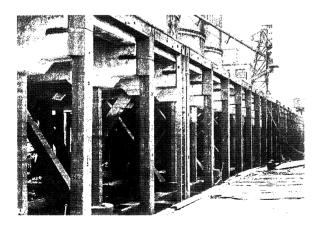


Foto 10.1.—Vista general, 1953.

Photograph 10.1.—A general view, taken in 1953.

Foto 10.2.—Primer plano, misma fecha.

Photograph 10.2.—A close up of the same date.



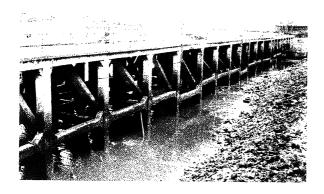


Foto 10.3.—Año 1988.

Photograph 10.3.—Taken in 1988.

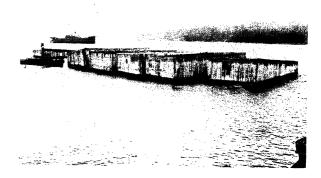


Foto 11.—1930 - muelle B, puerto Halifax, NS.

Photograph 11.—1930 - Pier B, Halifax harbor, NS.

1931 - Puente Montrose, Escocia. (1931 - Montrose bridge, Scotland).



Foto 12.1 (Photograph 12.1)



Foto 12.2 (Photograph 12.2)

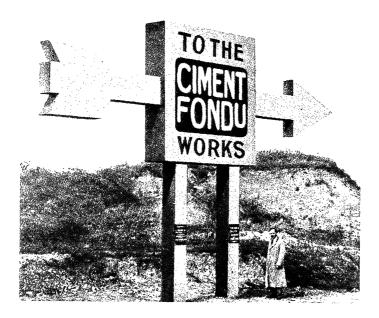


Foto 13.—1951 - Lago Arrow al oeste de Thurroc, Reino Unido.

Photograph 13.—1951 - The lac Arrow, west Thurrock, UK.

El suelo de este puente se hizo de hormigón Fondu. 70 años más tarde este puente, sobre el río Clyde, todavía está en servicio. (Foto 8).

Viaducto construido en su totalidad de hormigón Fondu, todavía se encuentra abierto al tráfico. (Foto 9).

Hay otro viaducto en el norte del Reino Unido. No existe mucha información sobre este diseño de cinco vanos que cruza el estuario del río Dee. La fotografía no tiene fecha.

El puente sigue soportando tráfico.

Las indagaciones no indican claramente en qué partes de esta estructura se utilizó hormigón Fondu. Sin embargo, durante la inspección en el año 1988, el suelo de estribos y la superestructura estaban en condición de servicio. (Fotos 10.1, 10.2 y 10.3).

265 pilotes de hormigón Fondu, junto con tirantes prefabricados y vigas, se utilizaron para construir este malecón marítimo.

Por encima de la señal del nivel superior del agua hay algunas armaduras expuestas, pero en la zona de marea todavía se pueden ver huellas del mallazo original. El deterioro global no es significativo. Las instalaciones originales en el malecón se han quitado y el malecón, hoy en día, sirve para atraque de los pesqueros locales. Este es otro ejemplo de durabilidad de hormigón Fondu en agua del mar. (Foto 11).

Esta fotografía, aunque no descubre mucho técnicamente, registra un evento de suma importancia en la historia de Ciment Fondu. Se enviaron 10.000 t a Nueva Escocia para la construcción de compuestos, se remolcaron y se sumergieron en agua para construir este gran muelle en el mar. Visitas periódicas han demostrado que este hormigón permaneció durable en el transcurso de los años. (Fotos 12.1 y 12.2).

Esta foto no tiene fecha, pero se trata de una vista de los primeros días de este elegante puente. La siguiente se sacó en 1988. La foto reciente muestra esfuerzos para reparar la superestructura de hormigón de cemento portland en estado de grave deterioro a causa de la reacción álcali-árido. Los muelles con hormigón Fondu se han comportado bien con el transcurso del tiempo. Este puente permanece en servicio normal. (Foto 13).

Muy acertadamente, LSC (entonces en la compañía Cemento Aluminoso Lafarge) hizo esta señal de hormigón Fondu en la entrada de las obras. La señal sigue estando ahí, tan sólido como siempre, y jeso no se debe a las capas sucesivas de pintura que le iban poniendo encima!.

The bridge deck was made with Fondu concrete. 70 years later this bridge, over the river Clyde, is still in service. (Fot. 8).

Another bridge over water, this one a road bridge, constructed throughout of Fondu concrete is still open to traffic. (Fot. 9).

Back to the north of the UK again for another road bridge. Background information on this five span design crossing the tidal estuary of the river Dee is scant. The photograph is not dated.

The bridge continues to carry daily traffic.

Records do not clearly indicate in what parts of this structure Fondu concrete was used. However, when inspected in 1988, piers deck and superstructure were all in serviceable condition. (Fots. 10.1, 10.2 and 10.3).

265 Fondu concrete piles together with precast braces and beams were used to construct this sea water jetty.

There is some exposed reinforcement above the high water mark but in the tidal zone traces of the original shuttering can still be seen. Overall deterioration is marginal. The original facilities on the jetty have been removed and the jetty itself now-a-days accommodates local fishing craft. Another example of the durability of Fondu concrete in sea water. (Fot. 11).

This photograph though technically not very revealing records a major event in the history of Ciment Fondu. 10,000 tons were shipped to Nova Scotia for the construction of the massive caissons, towed and sunk in place to enable this large pier to be built in the sea. Periodic visits have shown that this concrete has remained sound over the years. (Fots. 12.1 and 12.2).

Photograph 12.1 is an early but undated view of this rather elegant bridge. Photograph 12.2 was taken in 1988. The recent picture shows efforts to repair the superstructure which is a badly deteriorating Portland cement concrete, suffering from alkali-aggregate reaction. The piers, in Fondu concrete have stood up well to the tests of time. This bridge remains in normal, every day use. (Fot. 13).

Appropriately enough, LSC (Lafarge Aluminous Cement, Co. at the time) built this ponderous sign from Fondu concrete at the entrance to the works. It stands as solidly as ever today and not simply because of the successive coats of paint it has received!

Si la conversión puede ser una ventaja en un estado temprano, puede existir hasta peligro en la conversión retrasada, puesto que las resistencias transitorias aparentemente adecuadas del hormigón no convertido, hecho con demasiada agua, puede disfrazar una resistencia convertida inferior a la mínima precisa en el hormigón convertido a largo plazo.

En Gran Bretaña, en los años 70, preocupó mucho el colapso del techo en una escuela in Steney, Londres, en 1974. Una viga de hormigón prefabricado, pretensado, hecha de hormigón Fondu perdió resistencia y cayo. Los análisis siguientes demostraron que el hormigón estaba convertido y también reveló pruebas de ataque de sulfato, así que la verdadera causa del colapso aún es dudosa. De todos modos, el factor clave fue la calidad inicial del hormigón, se trataba de excesivas proporciones agua/cemento. Las recomendaciones en aquellos tiempos especificaban un contenido máximo de cemento (para bajar lo más posible el efecto de calentamiento y conversión) y se había utilizado una cantidad demasiado pequeña. Luego hizo falta una cantidad adicional de agua para obtener la docilidad necesaria para la colocación. Se trataba de vigas transversales bastante delgadas, así que el auto-calentamiento fue insignificante. De este modo, las resistencias iniciales, transitorias, no convertidas, permitieron que las unidades se pusieran en servicio. Si se hubieran convertido directamente desde el principio esto no habría ocurrido.

CONCLUSIÓN

Se ha ofrecido en este trabajo, una visión del comportamiento a largo plazo de los hormigones de cemento aluminoso (con referencia especial a Ciment Fondu), una visión que discrepa mucho del tratamiento tradicional del tema. Antes que referirnos a los "efectos dañinos de la conversión" hemos hecho referencia a la imposibilidad de evitarla como un fenómeno natural, a través del cual estos materiales alcanzan una condición "madura" y estable. Cuando se reconoce que es mejor provocar que retrasar la conversión, la capacidad del HAC de auto-calentamiento se convierte en un factor positivo importante. Realmente, la conversión no sólo no hace el hormigón vulnerable al ataque de agresivos, sino que proporciona hidratos termodinámicamente estables con una resistencia intrínseca aumentada al ataque.

La interpretación de la conversión y la durabilidad representa un punto de vista nuevo sobre un tema antiguo. Proporciona una visión coherente tanto de la durabilidad evidente de hormigones Fondu —se ofrecen varios ejemplos no publicados anteriormente— como una explicación de la verdadera causa de ciertos fallos (excesivo

If early conversion can be an advantage, there may even be some danger in delayed conversion, since the apparently adequate transient strengths of unconverted concrete made with excessive water contents may mask a converted strength below that needed in the long term.

In Britain in the 1970's much concern was generated by the 1974 collapse of a roof in a school at Stepney, in London. A precast, prestressed concrete beam made with Fondu concrete lost strength and failed. Subsequent analysis showed that the concrete was converted and also revealed some evidence of sulphate attack so that the actual cause of failure remains somewhat in doubt. The key factor however was the initial concrete quality-excessive water/cement ratios were involved. Recommendations at the time specified a maximum cement content (to minimize heat up and conversion) and too little had been used. Additional water had then been required to achieve the flow characteristics necessary for placing. The type of beams in question were of quite slender cross-section so that there was negligible self-heating. Initial, transient unconverted strengths thus allowed the units to be put in service. If only they had been directly converted from the outset this would not have happened.

CONCLUSION

We have given here an overview of the long term performance of Calcium Aluminate Cement . Concretes (with special reference to Ciment Fondu) which differs from much traditional writing on the subject. Rather than referring to the "harmful effects of conversion" we have emphasized its inevitability as a natural phenomenon whereby these materials achieve a mature, stable condition. From recognition that conversion is better provoked than delayed the self-heating capability of CACC becomes a valuable pratical asset. Indeed far from rendering a concrete vulnerable to corrosive attack, conversion provides thermodynamically stable hydrates with an enhanced intrinsic resistance to attack.

The interpretation of conversion and durability presented here represents a fresh look at an old subject. It provides a coherent view both of the evident durability of Fondu concretes —a number of previously unpublished examples are shown—as well as an explanation of the real cause of certain failures (use of excess water) that have

uso de agua) que han recibido publicidad sin precedentes.

Contemplando la conversión y la durabilidad en un futuro (como nos hemos propuesto en este trabajo) hemos presentado pruebas positivas de comportamiento a largo plazo. Esto no significa que se puedan ignorar problemas con el HAC más de lo que se ignoran problemas con los hormigones de cemento portland. Por ejemplo, muy recientemente, aparecieron muchos ejemplos de hormigón deteriorado en Cataluña. En abril de 1991, se examinaron 1.083 muestras de hormigón en malas condiciones de lugares distintos. 53 % eran de cemento portland y 47 % de HAC. La alta porosidad era común en todos, y el 58 % de las muestras eran hormigones hechos de áridos de mala calidad. El mensaje está suficientemente claro. Cualquier hormigón se comportará mal si está mal hecho, cualquiera que sea el cemento utilizado.

Lo que es importante cuando aparece el problema es estudiar la causa. Una investigación adecuada proporcionará más amplio conocimiento de cómo utilizar los materiales mejor en el futuro. Esto es seguramente el punto de vista adoptado con el OPC y lo mismo es aplicable al HAC.

Nuestros conocimientos hoy en día de la durabilidad de los cementos aluminosos se basa en 100 años de experiencia acumulada y estudios en laboratorio. Sabemos cómo utilizar estos materiales y sabemos qué esperar de ellos. Podemos estar seguros que nos servirán bien en el siglo próximo.

AGRADECIMIENTOS

Agracedemos a la Sra. Nina Baker su permiso de utilizar las fotografías 10.3 y 12.2 y a la Sra. Brenda Harris por habernos proporcionado las demás fotografías de los archivos Lafarge. También agradecemos el permiso de autores y editores de la referencia (4) para reproducir la figura 3.

received unprecedented publicity.

In putting conversion and durability in to perspective, as we have set out to do in this paper, we have presented positive evidence of long term performance. This does not mean that problems with CACC can be ignored anymore than problems with Portland cement concretes are ignored. Quite recently for example, many instances of deteriorated concrete have arisen in Catalonia. By April 1991, 1083 samples of concrete in poor condition had been examined from various sites. 53 % were Portland cement concrete and 47 % CACC. High porosities were common to all and 58 % of the samples were of concretes made with poor quality aggregates. The message is clear enough. Any concrete will perform badly if it is badly made, whatever cement is employed.

What is important when problems arise is to study the cause. A successful investigation will provide fuller understanding of how to use the materials better in the future. This is certainly the approach adopted with OPC and the same applies to CACC.

Our knowledge and understanding today of the durability of calcium aluminate bonded materials has been built on close to 100 years of accumulated experience and laboratory studies. Whe know how to use these materials and we know what to expect from them. We can be confident that they will serve us well in the century ahead.

ACKNOWLEDGMENTS

Whe are grateful to Mrs. Nina Baker for permission to use photographs 10.3 and 12.2 and to Mrs. Brenda Harris for providing the other photographs from the Lafarge archives. We also gratefully acknowledge permission of the authors and publishers of reference (4) to produce figure 3.

REFERENCIAS

REFERENCES

- (1) C. M. GEORGE: "Manufacture and Performance of Aluminous Cement: A New Perspective". In Calcium Aluminate Cements, Editor R. J. Mangabhai. Published by E. and F. N. SPON (Chapman and Hall), 1990, p. 181 ff.
- (2) C. M. GEORGE: "Industrial Aluminous Cements", in Structure and Performance of Cements. Editor P. Barnes. Applied Science Publishers, 1983, p. 415 ff.
- (3) P. J. FRENCH, R. G. J. MONTGOMERY and T. D. ROBSON: "High Concrete Strength Within the Hour". Concrete, Aug. 1971, p. 3 ff.

- (4) S. RACHID, P. BARNES and X. TURILLAS: "The Rapid Conversion of Calcium Aluminate Cement Hydrates as Revealed by Synchrotron Energy Dispersive Diffraction". Advances in Cement Research, April, 1992.
- (5) R. J. COLLINS and W. GUTT: "Research on Long-Term Properties of High Alumina Cement Concrete", Mag. Concrete Research, Vol. 40, No. 145. December, 1988, p. 195 ff.
- (6) R. G. J. MONTGOMERY: Previously unpublished work.
- (7) J. P. BAYOUX, J. P. LETOURNEUX, S. MARCDARGENT and M. VERSCHAEVE: "Acidic Corrosion of High Alumina Cement". In Calcium Aluminate Cements. Editor R. J. Mangabhai. Published by E. and F. N. SPON (Chapman and Hall), 1990, p. 230 ff.

* * *

publicaciones del ICCET/CSIC



FRANJETIĆ



Bohdan Lewicki

Este libro trata de los problemas relativos a la construcción de los edificios de viviendas o publicos realizados con elementos prefabricados de grandes dimensiones. Se han estudiado los problemas de arriostramiento, así como los que plantea la resistencia de los elementos y de la estructura; se han examinado las cuestiones de orden higrotérmico, acústico y de resistencia al fuego; también se ha profundizado en el estudio de la estanquidad de los muros exteriores y de las juntas.

La obra incluye numerosas ilustraciones que dan detalles de diversas soluciones, así como ejemplos de cálculo, tablas de valores numéricos, diagramas y ábacos.

Un volumen encuadernado en tela, de 24 x 17 cm, compuesto de 616 págs.

Zorislav Franjetić

En la obra de Franjetic se expone de una forma minuciosa, ordenada y sistemática, todo un cuerpo de doctrina que reúne el conocimiento actual sobre el endurecimiento rápido del hormigón. Parte el autor de los principios básicos y llega a las últimas consecuencias y realidades técnicas y económicas.

Es una obra de consulta, tanto para el investigador sobre la materia, como para el proyectista y el realizador y montador de plantas e instalaciones y equipos de curado y endurecimiento rápido.

Un volumen encuadernado en cartóné, de 17 x 24,5 cm, compuesto de 385 págs. 110 figuras y 10 tablas.

A. M. Haas

Al escribir este libro el autor intentó poner a disposición de los estudiantes y de los ingenieros unos conocimientos prácticos, adecuados para servir de guía en el diseño y construcción de láminas delgadas de hormigón.

El autor está convencido de que el éxito en el diseño de una lámina exige, por parte del proyectista, un examen de las tres fases por las que pasa la materialización de la lámina: el diseño, el análisis estructural y la construcción de la estructura.

Un volumen encuadernado en tela, de 17 x 24,5 cm, compuesto de 420 págs., 141 figuras, 22 fotografías y 6 tablas.