

# “Reflexiones sobre el caso de las piritas del Maresme”

NARCIS MAJO CLAVELL, Dr. Arquitecto

## INTRODUCCION

Esta comunicación intenta poner al alcance de todos unos datos y unas intuiciones para que se investigue el efecto que sobre el hormigón ejercen los áridos con piritas que, desgraciadamente, pueden ser la causa de problemas muy graves en el país.

Parece ser que el problema de la utilización de áridos con un cierto contenido de piritas es totalmente nuevo. Se ha estudiado el efecto que sobre el hormigón pueden tener muchos tipos de compuestos de azufre y, en especial, los ataques exteriores que se pueden presentar en forma líquida o gaseosa. Pero, concretamente acerca de las piritas se encuentran muy pocas citas bibliográficas y, aun, la mayoría hacen referencia más al mineral de piritas en sí, que a la presencia de piritas como impureza de otro tipo de grava. Ciertamente, existen textos en que desaconsejan su utilización como árido. Pero no he podido hallar estudio completo alguno de lo que sucede cuando se ha utilizado y sistemas para neutralizar sus posibles efectos.

Divagar sobre si es o no aceptable utilizar este tipo de árido, creo que no tiene ningún interés ante la realidad. El hecho concreto es que durante unos diez años se han venido construyendo obras con hormigón que contenía áridos con piritas y que en la actualidad se pueden contar por millares las obras en uso que los contienen.

Esta realidad plantea un reto a todos los que tenemos relación con la construcción para que resolvamos un problema nuevo. Si, a corto plazo, no se encuentran soluciones al problema técnico, se pasará indefectiblemente a un gigantesco problema económico-social.

La falta de una normativa adecuada a los nuevos tipos de explotación de áridos y de la necesaria garantía de control de origen nos ha llevado a este problema.

Hace un año que, con mi compañero Esteve Mach i Bosch, tuve mis primeros contactos con “las piritas” en un edificio que habíamos proyectado y dirigíamos conjuntamente. Era el D. O. D. (Departamento de Orientación y Diagnóstico) del Patronato Pro-Recuperación de Subnormales de Mataró y Comarca.

Tener que firmar la orden de derribo de una obra cuando aún está en construcción, hace reflexionar y buscar si es posible algún tipo de solución. Y sobre todo, cuando sabes que las causas que obligan a no aceptar la obra se repiten en miles de edificios construidos, y presentes que algún día pueden encontrarse en condiciones semejantes.

Desde entonces me interesé por el tema y comencé a buscar toda clase de información. He consultado, leído libros, visitado obras; he estudiado todos los informes que he podido localizar sobre aspectos del caso y, en conjunto, la consecuencia más clara que he podido entrever es el hecho de que existe un desconocimiento total de lo que sucede.

He visto muchos informes erróneos: Unos, basados en que los resultados de los análisis (practicados de acuerdo con la norma UNE 7 245) estaban por debajo del 1,2 % permitido, concluyen que no existe ninguna clase de peligro; otros confunden las fisuras de las expansiones de las piritas con las propias de retracciones; otros diagnostican poco recubrimiento de las armaduras, cuando realmente éstas se hallaban a 25 y 30 mm de la superficie; incluso alguien hizo recimentar un edificio por haber confundido grietas debidas a piritas con las correspondientes a asientos de cimientos. Quienes hemos tenido alguna relación con edificios “piritosos” hemos dado pasos en falso y cometido errores.

¿Qué es lo que pasa cuando se ha utilizado un árido con sulfuros e iones ferrosos? ¿Hasta qué punto es posible una degradación? ¿A partir de qué tanto por ciento es probable? ¿Cómo se pueden frenar las reacciones destructivas? ¿Cuándo llegarán a un nuevo estado estable? ¿Cómo se comporta el hormigón en cada punto de una obra?

Este problema, desconocido tanto por los técnicos de obra como por los de laboratorios de control, reclama respuestas urgentes. Los casos en los que se paralizan unas obras o se desaloja un edificio pueden ser considerados, a pesar de todo, muy afortunados, pues tememos que de un momento a otro llegarán noticias de algún accidente grave.

Es preciso que quienes conozcan algún aspecto del problema lo manifiesten y que se inicien investigaciones aceleradas si no queremos lamentar un “... demasiado tarde”.

En esta comunicación he querido reflejar todo lo que yo “sé” sobre los fenómenos producidos por las piritas. Está entresacado de todo lo que he tenido en mano y de mis ratos de reflexión.

No pretendo que las afirmaciones que hago en esta comunicación sean respuesta a las preguntas que pueden hacerse sobre la utilización de áridos piritosos. Sé que ello es imposible sin unos conocimientos y unas experiencias que no poseo. Expongo solamente lo que yo creo sirve de base de consideración y agradeceré las indicaciones de quienes puedan corregir todo lo que sea erróneo de mis puntos de vista.

La comunicación viene estructurada en los siguientes apartados.

- 1) Algunos datos sobre el árido.
- 2) Síntomas.
- 3) Procesos de corrosión.
- 4) Estudio de soluciones.
- 5) Métodos de reconocimiento.
- 6) Conclusiones.

## **ALGUNOS DATOS SOBRE EL ARIDO**

- 1) La cantera que ha suministrado los áridos causantes de los problemas del “Caso de las piritas del Maresme” inició su funcionamiento aproximadamente en 1963. Hace unos diez años.

2) Descripción de la cantera.—Transcribimos la descripción que de la misma se hace en la memoria de un proyecto del “Ministerio de Obras Públicas” del año 1969.

*Tipo de roca:*

Caliza.

*Denominación:*

Mont Palau.

*Situación:*

Pineda (término de Tordera).

*Propietario:*

Cantera Mont Palau, S. A. Irlanda, 21. PINEDA.

*Acceso:*

2.400 m de camino asfaltado que parte del p. k. 677,400 de la N-II.

*Descripción del campo:*

Afloramiento de caliza paleozoica gris negruzca semimarmórea.

Está surcada de filoncillos y alguna zona de milonitización.

Plegada y fallada. La red de diaclasas es bastante apretada.

Posee buena instalación, para unos 750 m<sup>3</sup>/día y plataforma para acopio. Las reservas son grandes.

*Descripción microscópica:*

Caliza de grano fino a medio, bien cristalizado, con tamaños homogéneos.

Se ven filoncillos de calcita y frecuentes microrroturas que denotan los empujes tectónicos.

Abundan en todas las láminas estudiadas las gravas de piritita bien cristalizada en cubos y dodecaedros. Algunas láminas son un tanto dolomíticas.

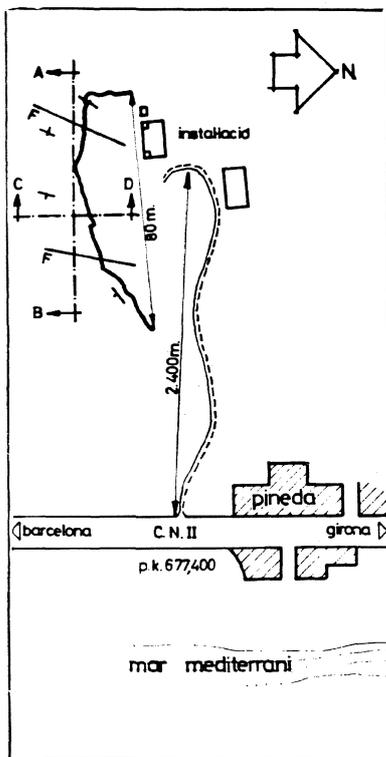
### **Comentarios**

Constituye un árido útil para obras de carreteras. Puede usarse en mezclas bituminosas y en capas de base y binder.

Es aceptable para capas de rodadura, aunque no es muy dura y relativamente pulimentable.

Los finos obtenidos en cantera son en principio aceptables como filler, ya que no son plásticos y la curva granulométrica (por sedimentación) bastante homogénea.

CROQUIS DE SITUACION



CANTERA

PEDRERA "MONT-PALAU"

SECCIONES ESTRATIGRAFICAS

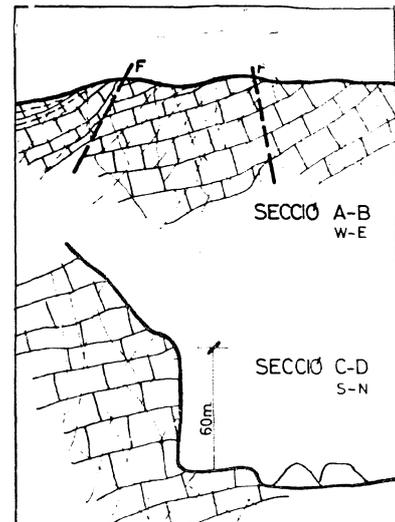


Gráfico 1

- 3) De los análisis que realizó el M. O. P. (desde VI-66 a X-68), para redactar el informe anterior entresacamos los siguientes datos referidos al árido:

	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	n.º muestras
Peso específico neto	2,75	2,80	2,66	13
Absorción	0,72	2,00	0,4	12
Friabilidad	21,32	25,00	17,8	9
pH	8,63	11,5	7,9	9
CO <sub>2</sub>	43,24?	79,20?	32,12	5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,06	4,55	3,45	6
CaO	42,08	42,76	40,30	8
MgO	2,28	4,42	0,2?	6
Residuo insoluble en CIH	12,54	15,49	9,83	7
SiO <sub>2</sub>	11,53	14,32	7,92	5
Materia orgánica	negativo			
Cloruros	negativo			
Sulfatos	negativo			
Con CIH se desprende de SH <sub>2</sub> en cantidad muy apreciable				2 filler

4) Los áridos que se obtienen en la cantera de Mont Palau tienen una composición heterogénea.

Transcribimos los resultados de un análisis químico efectuado por el “Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción” (Exp. n.º 34.229 de 12-IV-72). La muestra de árido salió de los silos de suministro de la cantera.

El árido remitido para su análisis presenta una mezcla de piedras, unas con un marcado color negro y otras de color gris. Ante esta heterogeneidad de su aspecto, se ha procedido a analizar por separado cada una de esas fracciones. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

	Fracción de color negro	Fracción de color gris
	Análisis por disgregación	Análisis por ataque con HCl
Sílice (SiO <sub>2</sub> ) %	50,1	6,5
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) %	16,3	2,3
Oxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) %	0,20	1,3
Oxido ferroso (FeO) %	2,7	1,7
Oxido cálcico (CaO) %	1,2	47,0
Oxido magnésico (MgO) %	1,3	1,5
Oxido de Manganeso (MnO) %	—	0,13
Anhídrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) %	4,4	0,23
Sulfuros (S <sup>=</sup> ) %	—	0,8
Pérdida al fuego %	17,4	36,6
Alcalis y sin dosificar	6,4	2,66
	100,00	100,00

De los datos analíticos obtenidos se deduce que el árido está constituido por una fracción de naturaleza arcillosa, tipo pizarra, de color negro y otra fracción de color gris cuya composición corresponde a una caliza margosa. Tanto la fracción negra como la gris presentan incrustaciones de piritita, apreciables a simple vista, a lo que se debe el contenido de sulfuros y hierro ferroso que se ha podido detectar por análisis químico...

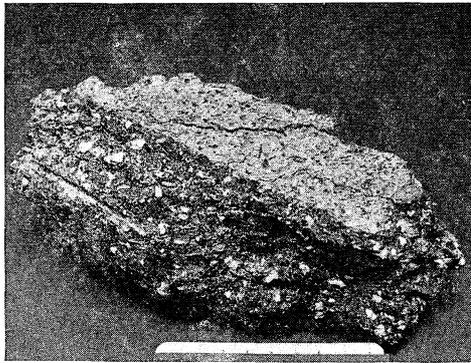
Estas diferencias en la composición del árido se han confirmado en todos los análisis realizados. En especial los estudios por difracción de Rayos X nos indican la presencia de piritita, marcasita, grafito, mica, cuarzo y calcita en proporciones variables (I.E.T.c.c. exp. 6.595 y 6.678).

## SINTOMAS

Para mejor conocimiento de cómo se presenta el problema de la descomposición del hormigón, resultado de haber utilizado áridos de Mont Palau, enumeramos y relacionamos gráficamente los síntomas apreciados en obras afectadas.

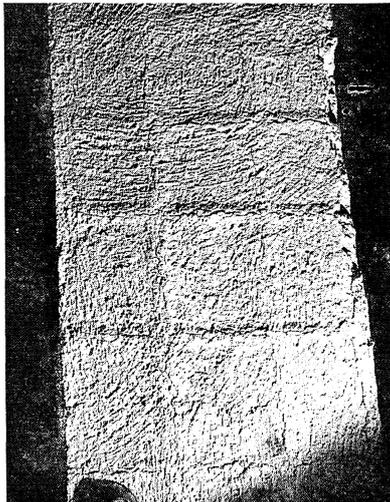
Hasta el día de la fecha hemos podido considerar desperfectos en 11 edificios destinados a viviendas, en tres puentes de carretera, en un acueducto, en una escuela profesional y en un Centro de Reconocimiento en construcción. Asimismo hemos reconocido también una partida de viguetas pretensadas en descomposición y una colección de probetas de 15 × 30 cm encontradas abandonadas en Orrius, que supongo pertenecen a obras de carreteras.

Es preciso aclarar que la relación siguiente corresponde a todas las manifestaciones que se han observado, y que en cada obra se presentan solamente algunos de los síntomas:



### 1. Destrucción total del hormigón

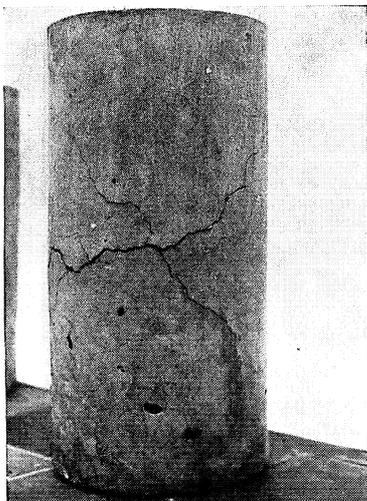
Parece ser que, con el tiempo, el fin de las obras de hormigón en las que se ha utilizado áridos que contienen piritas será de destrucción total. En la actualidad hemos visto ya piezas llegadas a este estado posiblemente por haberse dado condiciones favorables. En la fotografía presentamos parte de lo que fue una vigueta pretendada.



### 2. Grietas que se corresponden con las armaduras

Parte superior de una barandilla de un puente de hormigón armado. La iluminación rasante hace ver los hinchazones producidos por la corrosión del hierro.

Aparte del presente ejemplo podríamos citar grietas verticales en los cantos de las cabezas de los pilares y grietas que se corresponden con estribos, en zonas donde se ha podido comprobar el recubrimiento.



### 3. Grietas estrelladas, que salen de núcleos concretos

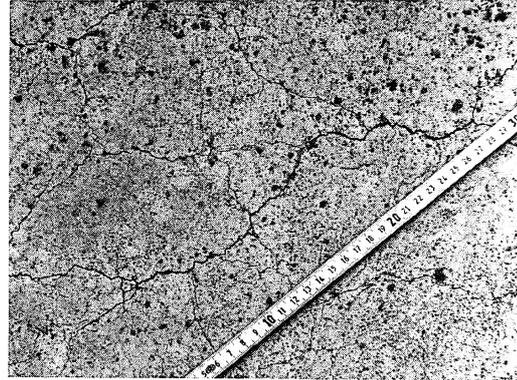
Probeta de  $15 \times 30$ , prevista para romper en la prensa, pero que quedó olvidada. Se halló rota al cabo de un año y medio de haberse confeccionado. Ello hizo revisar la obra de donde provenía (D. O. D. Mataró) y así empezó “el Caso de las Piritas del Maresme”.

Este tipo de grieta parece indicar expansiones en los áridos.

#### 4. Grietas sin núcleos muy claros

Estos tipos de grietas afectan normalmente zonas amplias y no tienen unas direcciones marcadas. Cuando son leves pueden confundirse con grietas de retracción u otras semejantes.

En la fotografía puede observarse detalle de la cara superior del forjado de la 2.<sup>a</sup> planta correspondiente al edificio del D. O. D. de Mataró, tal y como se hallaba al reconocer la obra.



Posteriormente, al extraer un testigo del techo de la 2.<sup>a</sup> planta, salió deshecho.

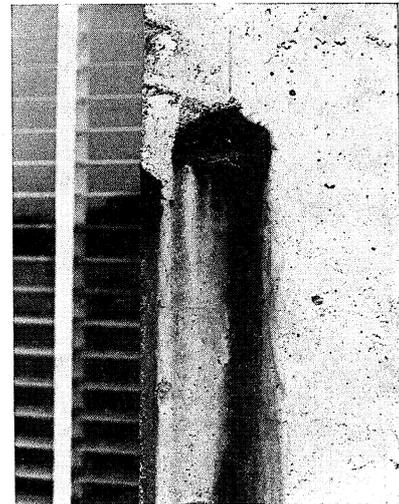
Actualmente ya se ha dado orden de derribo del edificio.

#### 5. Desconchados

Son parecidos a los producidos por terrones de cal mal apagada. Los produce una piedra negra de la que sale un chorrillo o humor de polvo del mismo color que se oxida con color de herrumbre. Es uno de los síntomas más diferenciado y evidente.

La fotografía corresponde a un pilar de la planta baja de una escuela de Mataró.

Podríamos presentar muchísimos casos donde se manifiesta con la misma evidencia.

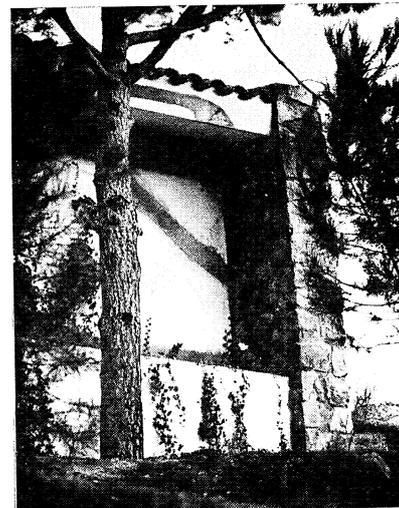


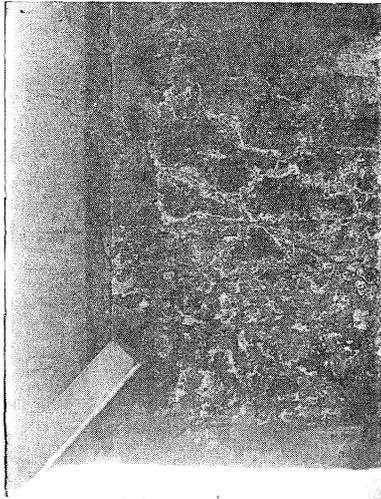
#### 6. Variación de dimensiones

Hemos podido comprobar que las variaciones dimensionales de las piezas de hormigón “píritoso” producen grietas en los elementos de obra que están adheridos o unidos a ellas.

La fotografía pertenece a un chalet de Llavaneras (Barcelona). La pared de piedra vista está formada por dos paramentos de obra vista, y el núcleo está relleno de hormigón compuesto de mortero y trozos de piedra. Al aumentar la altura de la pared se produjeron grietas (en este momento reparadas) en la pared del techo y en el forjado al que están unidos.

Hemos comprobado el mismo efecto en unas barandillas formadas sobre un forjado “píritoso”: se abren grietas que decrecen de abajo hacia arriba.



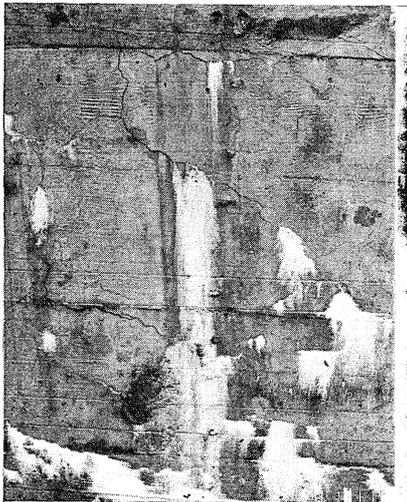


### **7. Eflorescencia**

Es muy general en todas las obras donde el hormigón es visto. La fotografía corresponde a la parte inferior del plancher de un balcón en una casa de viviendas en Mataró.

Las eflorescencias se presentan con muchas fisuras.

Se ha redactado un proyecto de sustitución del balcón, pero queda pendiente el reconocimiento.



### **8. Líquido que rezuma de las grietas**

La fotografía corresponde a la cara interior de la barandilla de un puente que sirve como acueducto a un torrente.

Estos mismos síntomas los he observado en fisuras de pilares que están a cubierto.



### **9. Variaciones de coloración**

En una obra que contenga piritas pueden distinguirse las zonas afectadas por los colores que va tomando el hormigón.

La fotografía corresponde a una vista lateral del edificio D. O. D. de Mataró.

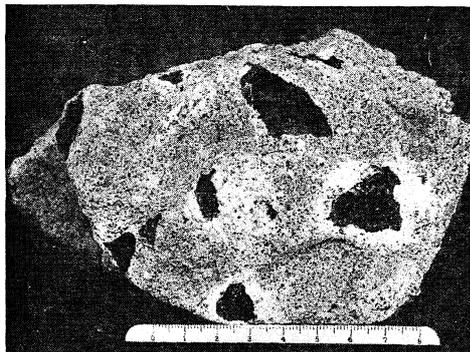
(El color verdoso que está tomando el hormigón no se aprecia en la fotografía).

## 10. Aureolas blancas alrededor de los áridos

Muestras de que el árido reacciona de algún modo con el hormigón son estas aureolas de color blanquecino que se forman en el material que envuelve el árido.

Supongo que si las analizáramos, detectaríamos ettringita.

Las dimensiones del anillo dependen de la calidad del mortero. La fotografía corresponde a una porción del hormigón interior de la pared del chalet de Llavaneras.



Este mismo síntoma se puede observar en la fotografía de la porción de vigueta pretensada con que ilustramos el síntoma nº 1, donde se aprecian áridos negros orlados con una fina raya blanca.

## PROCESOS DE CORROSION

Creemos que conocer el proceso destructivo del hormigón es totalmente necesario si queremos intentar alguna solución al mismo.

Por ello, a partir de reflexiones sobre los anteriores síntomas y sobre los análisis y consultas realizadas, hemos construido unos esquemas de procesos que posiblemente se dan cuando existen piritas en el hormigón, los cuales utilizamos como hipótesis de salida para los intentos de solución.

Uno de los desperfectos que hemos observado repetidamente en las estructuras afectadas es el desconchado que arranca a partir de una piedra negra y que, al atravesar la superficie exterior del hormigón, produce un chorrillo o humor de polvo negro que, con el tiempo se oxida y toma coloraciones características de la oxidación. Ello nos hace pensar en un árido inestable que sufre expansiones y que además se pulveriza.

Por los colores que toma el polvo oxidado anteriormente citado, suponemos la presencia de compuestos de hierro. (Comprobado con una aguja magnética).

Otro de los síntomas que nos hace pensar en una meteorización de los áridos, son las fisuras radiales con un núcleo bien definido.

El análisis químico de los áridos nos trae la conclusión de que contienen sulfuros y sulfatos en distintas proporciones y también hierro en estado ferroso. Difractogramas de los áridos indican la presencia de pirrotita y marcasita, ...

Otros desperfectos que se aprecian son variaciones dimensionales de los elementos de hormigón y fisuraciones dispersas sin núcleos claros, que a veces conducen a la descomposición total del hormigón. Todo ello hace pensar en problemas de expansiones del mortero provocadas por reacciones con el cemento. Hecho, comprobado por los difractogramas de mortero enriquecido entresacado de las zonas más descompuestas que señalan una presencia importante de ettringita secundaria.

Las fisuras paralelas a las armaduras próximas a la superficie, que se repiten con frecuencia en diferentes elementos constructivos, denotan la corrosión del acero. Secciones practicadas a través y por estas fisuras demuestran que las fisuras parten del redondo y que los recubrimientos de hormigón pueden estimarse correctos.

De todas las consideraciones anteriores intentamos deducir el proceso que puede producirse. Tal como lo expresamos no es completo y seguramente pueden existir muchas más interacciones, y también podría matizarse en muchos aspectos. Pero presenta una visión de conjunto.

El fenómeno puede desglosarse en un proceso químico de corrosión del hormigón y en un proceso electroquímico de corrosión del hierro.

### LA CORROSION DEL HORMIGON

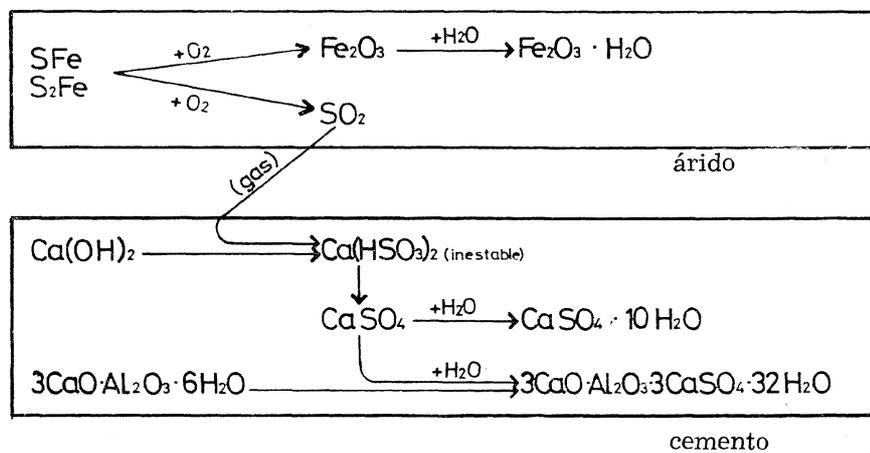


Gráfico 2

### CONSIDERACIONES QUIMICAS

Si, prescindiendo del tiempo necesario para que llegue a suceder, suponemos que el proceso ha llegado a estabilizarse:

- 1) Todos los compuestos estarán presentes en el hormigón y en unas proporciones fijadas por las constantes de equilibrio de las reacciones parciales y por los contenidos iniciales de cada material.
- 2) La aportación atmosférica ( $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ) puede considerarse infinita; por tanto, todas las reacciones donde intervengan estos elementos estarán totalmente desplazadas, y podemos considerar que se extinguirán totalmente los materiales que con ellos reaccionan.
- 3) La extremada insolubilidad de los sulfoaluminatos respecto a los demás compuestos hace que se desplacen totalmente las reacciones de donde se originan y, por tanto, se producirán en la cantidad máxima que permitan los compuestos que reaccionan.

- 4) La cristalización del yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) solamente se producirá cuando se haya formado todo el sulfoaluminato posible, si aún quedan los compuestos necesarios para formarlo.
- 5) Al desaparecer, por sulfatación, el hidróxido cálcico causante del carácter básico del cemento, disminuye el pH del hormigón.

### **CONSIDERACIONES TECNICAS**

1. La velocidad con que se realiza el proceso químico que hemos planteado es desproporcionadamente menor que la del proceso de hidratación del cemento. Podemos considerar sin mucho error, por tanto, que este proceso se realiza en un hormigón ya endurecido.
2. Las cristalizaciones de todos los compuestos secundarios (óxidos de hierro, sulfoaluminatos y sulfatos) tomando moléculas de agua de la atmósfera, tienen un carácter expansivo.
3. En el hormigón endurecido, las expansiones interiores no pueden ser absorbidas por deformaciones plásticas del mismo y, por tanto, originan unas tensiones que se suman a las propias de la estructura y que, por pequeñas que sean, las sitúan en una posición muy comprometida.
4. La fisuración producida por las primeras expansiones facilita la penetración del aire. Así se acelera todo el proceso degenerativo.
5. El grado de fisuración del hormigón dependerá de su resistencia a compresión y de su módulo de rotura potencial.

### **LA CORROSION DE LAS ARMADURAS**

Es ya un tópico el hecho de la pasivación del hierro en el hormigón causada por la presencia de hidróxido de calcio que ocasiona que el pH sea del orden del 12,5. Pero en nuestro caso falla la protección, y las armaduras resultan atacadas por procesos electroquímicos.

Para explicar el fenómeno nos hacemos las siguientes consideraciones:

- 1) El hidróxido cálcico del hormigón desaparece para pasar a formar sulfato cálcico, y con él también desaparece paulatinamente la protección básica. El fenómeno podría ser parecido, y se sumaría al de la carbonatación y al del lavado del hidróxido que hacen bajar el pH.
- 2) La presencia de aniones tipo  $\text{S}^-$  y  $\text{SO}_4^-$ , aumenta la conductibilidad eléctrica del electrólito y destruye la película que protege el acero, también en medio alcalino.
- 3) La presencia de carbón en forma de grafito en el árido puede ser una de las causas de que se inicien los procesos electroquímicos.
- 4) Por no ser todo el árido idéntico y por no estar idénticamente repartido se crean zonas de acidez diferente, con el peligro de creación de pilas de concentración.
- 5) Contribuye también a la formación de pilas el hecho de la aireación diferencial, que en nuestro caso explicaría las fisuras verticales en las cabezas de los pilares.

- 6) Las fisuras provocadas por la corrosión del hormigón y del hierro hacen perder también parte de la protección.

## **FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS DE CORROSION**

Estas reacciones parecen totalmente inevitables siempre que estén al alcance de oxígeno y agua aun en cantidades mínimas.

La velocidad de las reacciones así como también la duración hasta un nuevo estado estable depende de muchos factores, entre los que podríamos incluir:

- a) *Cantidad de árido "piritoso" por m<sup>3</sup> de hormigón.*
- b) *El porcentaje (%) de piritas en la piedra.*
- c) *La forma como se presenta la pirita.*—Parece ser que la pirita está presente en los áridos de la cantera bajo la forma de incrustaciones cristalinas apreciables a simple vista y también en forma pulverizada repartida en el conjunto del material que la contiene. Podríamos asimilar este hecho al que ya exponemos en el punto (e), o sea, que es mucho más fácil de atacar cuando está pulverizada.
- d) *Tiempo de aireación de la grava.*—Podemos suponer de entrada que en la cantera las condiciones en que estaba la grava impedían cualquier tipo de oxidación (hace miles de años que existía y ha venido conservando una forma inestable a los agentes atmosféricos).

La reacción comienza por tanto en el momento en que, por la extracción, se expone al aire y es mucho más rápida cuando está apilada, con acceso directo del oxígeno, que cuando se incluye en el hormigón, donde la reacción queda algo frenada por el recubrimiento impermeable del mismo hormigón. Considero que el tiempo de depósito externo de la grava influye de una manera muy importante en las velocidades con que se realizará la reacción, pues en el momento de ser incluida en el hormigón puede haber ya una parte importante de sulfuros transformados en sulfatos.

- e) *Dimensión del árido.*—Como que en la reacción tiene la máxima influencia la posibilidad de acceso del oxígeno y del agua, parece ser que influirá en gran manera, a igualdad de volumen, la superficie del grano y la distancia de cada molécula a esta superficie. Podemos intuir pues que, a mayor tamaño del grano, la duración será mayor y que será menor cuanto más pequeño sea el grano.
- f) *Permeabilidad del material donde está incluida la pirita.*—En el caso que nos ocupa la pirita no es el material predominante, sino que está incluida en gravas de diferentes composiciones. Como mínimo se han identificado calizas margosas, arcillas (tipo pizarra) y grafitos. Aparte de otras características, creemos que la permeabilidad del material que contiene la pirita influye de modo importante sobre la velocidad de las reacciones.
- g) *Grosor y calidad del recubrimiento.*—Ya hemos dicho que el acceso de los agentes atmosféricos era importante. Según el recubrimiento que tenga el árido en la obra y la calidad del mismo se consigue una mayor o menor impermeabilización a los gases, frenando o acelerándose la reacción. Ello nos lleva a la conclusión de que las reacciones de oxidación de los áridos y los desperfectos resultantes son progresivos desde la superficie hacia el núcleo de los elementos de hormigón. Muestra de ello son los desconches producidos por un núcleo de piedra negra (Síntoma 3).

h) *Estado de fisuración del hormigón que la contiene.*—Al fisurarse el hormigón, se produce un aumento notable de la superficie de contacto con el aire y, por tanto, en un hormigón fisurado las reacciones se aceleran proporcionalmente con el grado de fisuración. Según ello, la reacción sería mucho más rápida en las zonas que trabajan a tracción (normalmente fisuradas) que en las que trabajan a compresión.

Si admitimos que las reacciones son expansivas y producen fisuras, y que la velocidad de reacción es en cierto modo proporcional al grado de fisuración, tendremos que concluir que la degeneración del hormigón se produce en cadena. Pero puede decirse que el proceso está limitado por la cantidad de compuestos inestables existentes, y por tanto, a medida que avanza, la reacción se frena paulatinamente por falta de combustible.

- i) *Dosificación de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón.*—Partiendo de una base de igualdad para los demás factores, a más cemento, más aluminatos. Además los módulos de elasticidad, la resistencia de rotura y la permeabilidad del hormigón varían en dependencia a la dosificación de cemento.
- j) *Contenido de cal libre y forma de presentarse en el cemento.*—El hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento constituye la reserva básica que protege el hierro. El contenido de cal influye también en la formación de los sulfatos y de los sulfoaluminatos.
- k) *Contenido de aluminatos del cemento.*—Estos son los tipos de compuestos del cemento que reaccionan con los sulfatos para formar la ettringita.
- l) *Contenido de yeso en el cemento.*—El yeso, al combinarse con el aluminato durante la hidratación del cemento, hace bajar el contenido de aluminatos que podrán reaccionar en el hormigón endurecido.
- m) *Presencia de otros compuestos que actúen en el mismo sentido.*—Si, aparte de los efectos del proceso piritoso, se dan otros procesos paralelos que se adicionan, los resultados serán mucho más rápidos y graves. Como ejemplos podríamos citar la presencia de cal sin apagar y de MgO, contacto con aguas selenitosas, presencia de cloruros...

## ESTUDIO DE SOLUCIONES

Solucionar un problema de degeneración de hormigón no es siempre fácil ni posible. Las soluciones que desde un punto de vista técnico se proponen, generales a todos los casos de poca resistencia de un elemento estructural, son: el esfuerzo, la suplencia y la sustitución. Estos métodos solamente se podrían aplicar cuando las zonas afectadas fueran relativamente pequeñas y perfectamente localizadas. Pero respecto al refuerzo y a la suplencia debe tenerse en cuenta que el hormigón piritoso continúa presente en la obra y que, aunque no cumpla ninguna función resistente, puede crear problemas al agrietarse y producir movimientos.

Cuando la zona afectada del edificio es importante, ninguno de los métodos anteriores es factible, pues equivalen prácticamente al derribo total de la estructura y con ella de todo el edificio para reconstruirlo. No podemos pensar, por ejemplo, en doblar la estructura de un edificio construido con forjados reticulares.

Extinguidos los recursos propios de la tecnología de la construcción, para nuestros problemas será preciso pedir soluciones a otras técnicas.

En el capítulo anterior hemos visto los procesos que nos imaginamos se producen en un "hormigón piritoso". De su análisis he entresacado ciertos caminos de posible solución. No son remedios absolutos, siendo también posible que las soluciones surjan de la utilización de varios en conjunto. De todas formas, me proclamo pesimista en cuanto a la obtención de un éxito inmediato.

### **PROTECCION ELECTRICA DE LAS ARMADURAS**

Si uno de los problemas que se plantea es la corrosión electroquímica de las armaduras, la protección catódica nos facilita un medio para restablecer las condiciones de inactividad del hierro. Tanto si se utiliza el método del ánodo de sacrificio como si se emplea el de las corrientes impresas, la aplicación es muy fácil por estar, normalmente, todos los rebardos en contacto.

### **EVITAR LAS CRISTALIZACIONES**

Las expansiones producidas en el interior del hormigón se deben a la cristalización de todos los productos secundarios de las reacciones citadas cuando se habló de los procesos de corrosión.

Los procesos de cristalización se dificultan y hasta llegan a paralizarse totalmente cuando la disolución se mantiene en movimiento.

Si mantenemos en movimiento una disolución de sulfatos en la que se ha sumergido cemento endurecido pulverizado, se puede comprobar que la formación de sulfoaluminatos es mucho más pequeña y lenta que estando la misma en reposo (Alexandro Steopoe).

Un camino experimental sería el someter a vibraciones (ultrasonidos) los elementos de hormigón y observar si se realizan las expansiones sulfáticas.

Si diera buen resultado, sería muy fácil evitar las expansiones distribuyendo convenientemente por el edificio fuentes ultrasónicas.

### **DERIVAR LOS PROCESOS HACIA OTROS COMPUESTOS**

Otra solución a investigar podría ser el tratamiento de las piezas de hormigón con algunos productos químicos que, al reaccionar con los compuestos peligrosos, tendieran a la formación de unos nuevos compuestos secundarios que fueran estables pero no expansivos.

No conozco ninguna reacción con estos resultados.

### **EVITAR LA ENTRADA DE AIRE**

Si el proceso de corrosión del hormigón comienza y se produce por la aireación del árido y las reacciones consiguientes, parece ser que la cosa más fácil sería evitar la entrada de aire.

La impermeabilización eficaz de la superficie del hormigón tiene muchos problemas. Hablar de impermeabilización en términos absolutos refiriéndonos a gases, para elementos pequeños y por tiempo indefinido, es imposible, aun prescindiendo de la dificultad de dar a la obra una protección sin ninguna clase de discontinuidad y prescindiendo también del fenómeno de las fisuraciones que pueden romper la citada protección.

Pensar en un recubrimiento impermeable pasivo es una utopía. Pero podríamos pensar en recubrimientos activos que a más de dificultar físicamente la penetración del aire actuaran químicamente como tampón, absorbiendo todo el oxígeno y todo el vapor de agua. Productos que actúen de este modo podrían ser localizados en todos los campos de la química y hasta en la biología. Recordemos por ejemplo el “Spirovibrio desulfuricans” que siendo tan ávido de oxígeno llega a producir el paso de los sulfatos a sulfuros absorbiendo el oxígeno. De esta manera podríamos conseguir además un cierto grado de involución en los procesos destructivos.

### **ACELERAR LAS REACCIONES**

En este estudio de soluciones lo que nos proponemos es intentar salvar al máximo la economía, pero evitando siempre los accidentes.

Si no encontráramos ninguna solución que nos satisficiera totalmente quedaría aún la posibilidad de acelerar todos los procesos hasta llegar al estado final estable, con lo que se dejaría completamente reconocida la capacidad resistente de la estructura y se podría decidir con absoluta seguridad sobre la posibilidad de utilización de la obra.

### **METODOS DE RECONOCIMIENTO**

Los métodos de reconocimiento de la obra nos han ocasionado serios problemas, pues los resultados que de ellos se obtenían, a menudo eran diferentes o contradictorios. Se ha podido comprobar que muchos de los métodos de análisis del hormigón son totalmente inseguros y, hasta cierto punto, erróneos en el caso que nos ocupa.

### **METODOS DE RECONOCIMIENTO QUE NO CONSIDERO VALIDOS**

#### **EL ESCLEROMETRO**

Es muy conocida la dificultad de correlacionar la dureza superficial del hormigón y su resistencia a compresión. Ello conduce a que la estimación de las resistencias de un hormigón a partir del índice esclerométrico, presente siempre problemas y que, normalmente, en una misma partida de hormigón, solamente se le otorgue carácter de comparación con respecto a unos valores obtenidos por algún otro sistema más seguro.

En nuestro caso, y en general en cualquier caso en que el hormigón pueda estar fisurado, pierde incluso este valor de relación, pues al medir la dureza superficial por rebote del martillo nos indica solamente la calidad del hormigón, prescindiendo del hecho de la fisuración, que puede restarle una parte muy importante de su resistencia.

Imaginemos lecturas esclerométricas en dos hormigones de la misma calidad, pero estando uno de ellos fisurado. Los valores del índice esclerométrico serán idénticos, pero la resistencia real será muy inferior en un caso que en otro. Podría también darse el caso de que el hormigón fisurado diera un índice más elevado debido a un fenómeno de carbonatación acelerada de la cal por tener mayor superficie al aire.

#### **ROTURA DE TESTIGOS A COMPRESION**

Este método de reconocimiento del hormigón es en general aceptable como exacto y da valores que se aproximan suficientemente a la realidad, siempre que la extracción y ruptura se den en condiciones determinadas.

No obstante cuando en el interior del hormigón se producen fenómenos de expansión, debe ponerse en duda el valor de este ensayo.

Es evidente que al romper el testigo la prensa nos indica el valor exacto a que rompe el trozo de hormigón en una dirección determinada y en un momento concreto. Pero a veces, tanto como la resistencia del hormigón en el momento de la prueba, nos interesa poder saber cuál será su comportamiento en el futuro y en este aspecto falla totalmente la citada prueba.

Antes de fisurarse, la influencia de una expansión en el forjado puede asimilarse a un aumento de resistencia a tracción.

Con gráficos podemos valorar estas influencias. Los gráficos corresponden a un punto infinitesimal dentro del hormigón. Para simplificar se ha supuesto que el aumento de las presiones internas es lineal.

### Gráfico 3a

Si se da un fenómeno de expansión en el interior del hormigón endurecido, se producen unas presiones internas al no poderse deformar. Si el proceso continúa, las presiones aumentarán paulatinamente hasta que al fisurarse el hormigón puede realizarse la expansión libremente.

### Gráfico 3b

La capacidad resistente del hormigón a tracción disminuye paulatinamente cuando se utiliza para contrarrestar las presiones internas. Cuando toda la resistencia del hormigón a tracción se ha agotado por las presiones internas, el hormigón, en aquel punto, se rompe ( $t_f$  = fisuración).

### Gráfico 3c

El hormigón con presiones internas aumenta su resistencia a compresión, pues a la resistencia propia se le adiciona el esfuerzo de las presiones internas. Al fisurarse, en aquel punto, desaparece la sección de hormigón, y por tanto, su capacidad resistente.

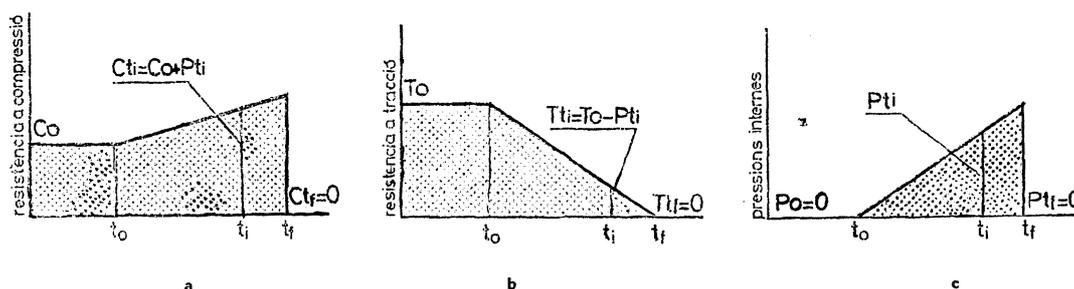


Gráfico 3

Entrando en la realidad, los fenómenos previstos para un punto quedarían matizados, pero continuarían teniendo idéntico sentido.

Si como control de un hormigón practicáramos paulatinamente pruebas a compresión, resultaría que en principio los resultados serían cada vez mejores. Hasta que a partir de un cierto momento descenderían de repente los resultados. Las lecturas anteriores podrían indicar error ya que, si desconociéramos la existencia del proceso, podríamos pensar que realmente se tratara de un hormigón en trance de endurecimiento.

En el caso de un hormigón en el que se prevén fenómenos expansivos sería mucho más indicativo hacer comprobaciones de resistencia a tracción.

La fisuración hace aumentar brutalmente la dispersión de los resultados de las pruebas de compresión ya que, a la vez, existen zonas de resistencias incrementadas y zonas de resistencias disminuidas (zonas fisuradas).

Cuando el hormigón ha fisurado, las roturas de testigos dan resistencias muy inferiores a las propias del hormigón, ya que la sección real del hormigón ha quedado reducida por las fisuras. Pero ello no nos da ningún camino para conocer la resistencia real del elemento fisurado, porque:

- 1) No podemos pensar en una fisuración isótropa dado que la fisura es producida por la suma de las presiones internas y de los esfuerzos que soporta el elemento en cada punto.
- 2) La extracción de testigos se hace normalmente en sentido perpendicular al del trabajo del elemento de hormigón.
- 3) Al romper un testigo se desprecia totalmente la colaboración que en la realidad dan las armaduras en cuanto a estabilizar un hormigón fragmentado.

A partir de todas las consideraciones anteriores podemos concluir que ni el esclerómetro ni la ruptura de testigos nos dan ninguna clase de indicación sobre el comportamiento real de la estructura en un momento dado, a la vez que tampoco puede desprenderse de los mismos lo que sucederá en un momento posterior futuro o bien próximo.

### EL "PACHOMETRE"

Las indicaciones del "Pachomètre" y de todos los aparatos que, como él, se basan en la transmisión de ondas electromagnéticas para localizar y medir el hierro en el interior del hormigón, son totalmente erróneas cuando los áridos que forman el hormigón son magnéticamente activos.

En nuestro caso tenemos unos áridos con compuestos de hierro en una proporción variable según el material y, también, en evolución. Cuando cambia la forma química con la que se presenta el hierro, también pueden variar sus propiedades magnéticas.

Experiencia completa de ello tuvimos en una de las obras afectadas, donde debido a las lecturas del "Pachomètre" se diagnosticó que unas fisuras paralelas a las armaduras eran debidas al poco recubrimiento (el aparato señalaba de 0 a 5 mm). Cuando se descubrió el hierro para comprobarlo se apreció que el recubrimiento era de 25 mm y, por tanto, completamente aceptable en un ambiente normal.

### LA NORMA "UNE 7 245"

Analizando muestras de áridos procedentes de la cantera se comprobó que el contenido total de azufre según la norma UNE 7 245 variaba de acuerdo con la dimensión del árido analizado (normalmente influyen también otros factores y no es tan claro):

	0-5	5-12	12-18	18-25	
SO <sub>4</sub> = %	1,54	1,13	0,60	0,57	I.E.T.c.c. exp. 6.571

El resultado era muy raro, pues las diferentes granulometrías se habían obtenido de la misma clase de piedra y aproximadamente en las mismas fechas; ello hizo pensar en la posibilidad de que la realidad quedara escondida por algún fenómeno extraño.

Repasando la metodología fijada en la Norma puede observarse que el orden es el siguiente: 1.º disolución en  $H_2O$ ; 2.º disolución en  $ClH$  diluido y 3.º oxidación y disolución en  $NO_3H$  para oxidar los sulfuros. Si tenemos en cuenta que la mayor parte de los sulfuros desprenden hidrógeno sulfurado en forma de gas al ser atacados con  $ClH$  diluido, podemos intuir que cuando se intenta oxidarlos con ácido nítrico ya han desaparecido en gran cantidad.

Los sulfuros de hierro en contacto con el aire se oxidan lentamente y pueden pasar a sulfatos, que son los compuestos perfectamente controlados por el análisis de la norma.

La oxidación de los sulfuros por efecto del aire es un fenómeno eminentemente de superficie, cosa que explicaría la progresión de los resultados, ya que aumentando el tamaño del árido se reduce la relación superficie/peso.

Así pues esta Norma (la UNE 7 245) no debería de emplearse nunca para intentar medir sulfuros, ya que el error por defecto que introduce puede ser muy importante; asimismo da por idóneos áridos que no lo son, como desgraciadamente se ha podido comprobar.

#### **INSTRUCCION (O. 20 de marzo 1944) PARA EL PROYECTO Y EJECUCION DE OBRAS DE HORMIGON**

En el artículo 9, que hace referencia a áridos, se explica un método para determinar los compuestos de azufre perjudiciales consistentes en sumergir el árido en un volumen de agua y, al cabo de 24 horas, medir el contenido de anhídrido sulfúrico ( $SO_3$ ). Caso de que solamente existan sulfuros, es de esperar que no puedan ser detectados.

#### **METODOS UTILIZABLES**

Visto que los medios corrientes de reconocimiento de los áridos y del hormigón no son aptos ante piritas, me ha interesado localizar procedimientos que pudieran informar sobre su comportamiento; acto seguido relaciono los métodos que he podido encontrar que dan algún tipo de información correcta.

#### **RESISTENCIA**

Sobre el comportamiento resistente real de la estructura no he localizado ningún método que pueda considerarse suficientemente aproximado y en estas circunstancias la única forma de conocimiento serían las pruebas de carga directa sobre la estructura; pero en las condiciones en que se encuentran las obras afectadas no creo que sea prudente hacer pruebas de carga sin tener idea del grado de resistencia.

Un ensayo que podría informar sobre la variación de la fisuración y de las presiones internas en el hormigón sería la rotura de piezas a tracción. En general solamente serviría para controlar la evolución del fenómeno sin darnos ningún dato concreto.

## **DETECCION DE FISURACION**

Hemos visto que la dureza superficial se conserva prácticamente aun cuando existe fisuración y que contrariamente la resistencia a compresión de los testigos se ve muy disminuida. Un método que nos puede informar sobre el estado de fisuración de un elemento sería comparar el índice esclerométrico con el resultado de la rotura de testigos. Una gran diferencia entre los dos resultados indicaría que el hormigón está fisurado.

Un método no destructivo sería la medición de la velocidad de transmisión de ultrasonidos.

## **PRESENCIA DE SULFUROS**

Para obtener fácilmente muestras de hormigón pulverizado hemos utilizado un taladro percutor con broca de vidia recogiendo el polvo en bolsas de plástico fijadas con papel adhesivo sobre la superficie.

Todos los métodos cualitativos que indicamos pueden servir tanto para el reconocimiento de áridos como para el del hormigón:

- 1) Atacar material pulverizado (en polvo) con CIH diluido en caliente, removiendo fuertemente en principio para que se desprenda primero el  $\text{CO}_2$  producido por las calizas, y detectar después el posible sulfhídrico que se desprende, bien por el olor de huevos podridos o bien con papel de acetato de plomo que toma coloración negra por formación de sulfuro de plomo.
- 2) Sobre una porción de hormigón se coloca un papel de filtro impregnado con CIH, se cubre con otro papel de filtro impregnado con acetato de cadmio. Si existen sulfuros el papel de cadmio toma coloraciones amarillentas de sulfuro de cadmio (I.E.T.c.c. Exp. 6.959).
- 3) Sobre una porción de hormigón se coloca un papel fotográfico impregnado con ácido clorhídrico. Si existen sulfuros se forman manchas de color amarillo-castaño de sulfuro de plata (I.E.T.c.c. Exp. 6.595).
- 4) Difracción de rayos X, localizando en los difractogramas las indicaciones correspondientes a los diferentes sulfuros. Cuando los sulfuros se presentan, en pequeña proporción sus señales pueden estar prácticamente ocultas por las de otros compuestos (I.E.T.c.c. Exps. 6.595 y 6.678).

## **MEDICION DE SULFUROS**

Puede emplearse el método indicado en el apartado 2.721 "Azufre al estado de sulfuro" del "Pliego General de Condiciones para la recepción de Conglomerantes Hidráulicos" (O. 9-IV-64), que consiste en atacar la muestra con ácido clorhídrico absorbiendo los vapores sulfhídricos en una solución de acetato de cadmio, y haciendo una valoración iodométrica del sulfuro precipitado.

## **DETECCION DE COMPUESTOS DE HIERRO**

Aparte de los métodos químicos normales y de los difractogramas podríamos citar la valoración de la susceptibilidad magnética.

Una manera muy simple de hacerlo consiste en suspender un imán de potencia en forma de péndulo y acercar el material que se prueba. Si la muestra contiene hierro puede hacer oscilar el péndulo muy visiblemente.

## CONCLUSIONES

- 1) La presencia de piritas en áridos de hormigón no es solamente un problema hipotético que puede prevenirse, sino un problema real que hoy se nos presenta en Cataluña en toda su dramática magnitud.
- 2) Teniendo en cuenta y considerando el tiempo de funcionamiento de la cantera (unos 10 años), la capacidad de la instalación y el hecho de ser la única cantera de toda la comarca con acceso asfaltado, es previsible que la extensión en situación y volumen de este árido sea enorme.
- 3) La piedra de la cantera es de composición muy heterogénea.
- 4) Prácticamente en todas las muestras analizadas se detecta la presencia de piritas.
- 5) En el árido la pirita no está presente como material básico sino como impureza, en un porcentaje variable pero muy pequeño.
- 6) Debe paralizarse la cantera en evitación de que persista el problema.
- 7) Los síntomas que presentan los edificios afectados demuestran la existencia de expansiones en el árido, en el cemento y en las armaduras, de la misma manera que denotan reacciones químicas.
- 8) Alguno de los síntomas no son solamente típicos de las piritas y pueden inducir error en el diagnóstico.
- 9) La degeneración del hormigón se realiza por una serie de procesos corrosivos complejos.
- 10) Debe iniciarse urgentemente una investigación sistemática para determinar cuáles son los procesos que provocan esta degeneración para poderla paralizar.
- 11) En la búsqueda de soluciones debe considerarse que, prácticamente, la totalidad de las obras son habitadas o están en uso.
- 12) Aunque obtener una solución total para las obras afectadas es imposible, debe intentarse conseguir unas condiciones de seguridad aceptables durante el tiempo necesario para la amortización de las obras.
- 13) En todo caso deben evitarse accidentes.
- 14) En el presente "caso" deberían establecerse unos porcentajes máximos aceptables de compuestos peligrosos. Así como también un método para cuantificar los contenidos en áridos.
- 15) Todos los sistemas que garantizan un medio ambiente artificial deben nutrirse de aportaciones energéticas o materiales.
- 16) Los métodos normales de reconocimiento de obra no son adecuados cuando se intuye la presencia de áridos piritosos.

- 17) Para localizar rápidamente la mayor cantidad posible de edificios afectados sería preciso un método muy simple de reconocimiento a pie de obra que denotara la presencia de áridos piritosos. A ser posible debería ser método no destructivo. Podría comprobarse si se dan determinados tipos de fluorescencias diferenciales cuando se somete el hormigón piritoso a alguna radiación.
- 18) Es necesario crear una metodología de control del proceso destructivo que se da en el hormigón. Sería conveniente realizar ensayos normalizados para conocer el estado de las reacciones que se estuvieren produciendo, la velocidad de degeneración y la inminencia del peligro. También serían precisos análisis para conocer el fin del proceso.
- 19) Como control de la capacidad resistente de los edificios tendría que metodizarse algún sistema que indicara la evolución de las resistencias que se dan en un momento dado y las que se dan en momentos posteriores o bien a las finales a que tiende.
- 20) Los métodos de reconocimiento de áridos propuestos por la "Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón" solamente son válidos para los áridos de superficie.
- 21) En previsión de futuros problemas parecidos es necesaria la creación de una normativa para que puedan comprobarse la estabilidad de los áridos en contacto con la atmósfera y los compuestos que pueden formarse que sean capaces de reaccionar con el cemento.
- 22) Debe iniciarse urgentemente la investigación sistemática de los efectos que los áridos piritosos pueden producir en cada uno de los elementos de la obra (cimientos, pilares, vigas...).
- 23) Para garantizar la calidad de los áridos sería preciso practicar análisis sistemáticos en el lugar de extracción y crear con carácter obligatorio algún tipo de "autorización de uso". Creo que la "autorización de uso" debería ser obligatoria para todos los productos que integran una obra.
- 24) Para solucionar los problemas económicos que se originan en casos como el presente en que moralmente no puede exigirse ningún tipo de responsabilidades, y que en el ramo de la construcción son frecuentes, creo debería crearse un "seguro de riesgo objetivo a la construcción".

Trabajo realizado con la colaboración de D. MANUEL SALICRU i PUIG, Aparejador, de la Comisión Mixta Intercolegial del Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña y Baleares y del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Cataluña.