

Estudio de la degradación del hormigón a través de su microestructura

Study of concrete deterioration through its microstructure

MOEMA RIBAS SILVA
Universidad de Brasilia
BRASIL

Fecha de recepción: 24-V-93

RESUMEN

Las morfologías observadas en la microestructura del hormigón indican una degradación microbiológica del material. Algunas hipótesis son sugeridas por la presencia de los microorganismos en el hormigón. Su microestructura fue analizada por las técnicas específicas, y algunas microfotos de las morfologías y de los productos de degradación son presentadas en este trabajo.

SUMMARY

The observed morphologies in concrete microstructure indicates a microbiological deterioration of the material. Some hypothesis are suggested, for the presence of the microorganisms in concrete. Its microstructure has been analysed through specified techniques and some microphotos of the observed morphologies and deterioration products are shown in this work.

1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento del hormigón se da después de cierto tiempo, variable para cada tipo y condiciones respectivas de servicio: medio ambiente, cargamento, ataque químico, etc.

De un modo general, el factor químico es una de las razones de degradación del hormigón y en un gran número de casos no se conocen las causas reales y se hace apenas una recuperación basada en los síntomas visibles.

El estudio de la microestructura ayuda a comprender los fenómenos ocurridos, así como prever las condiciones futuras del material permitiendo determinar las causas reales de degradación del material y, consecuentemente, sugerir una reparación más adecuada para cada caso.

El estudio de la microestructura del hormigón exige la utilización de diversas técnicas, de entre las cuales deben ser escogidas

1. INTRODUCTION

The intensity of the process of concrete aging depends on the environment in which it is placed, loading conditions, and other factors such as chemical attack etc.

Of these, chemical attack is one of most important reasons for concrete degradation. In most cases, the real cause is not known and a recuperation based solely on observation and some limited tests is possible.

The microstructure study of concrete requires the use of many techniques. An adequate choice must be carefully made, in order to obtain useful results.

In some cases, the use of electronic microscopy is necessary, as for example in studies of alkali-silica reaction (ASR), where the presence

las más radicales para los resultados pretendidos.

Hay casos en que resulta imprescindible la microscopía electrónica, como por ejemplo la verificación de la existencia de reacción árido-álcali, donde la presencia del gel que le es característico puede ser detectada por esa técnica.

En este trabajo se han utilizado, junto con la microscopía electrónica de barrido, otros tipos de análisis y cálculos complementarios, los cuales permitieran detectar, además de los problemas de las estructuras analizadas, la ausencia de reacción árido-álcali.

Se muestran algunas morfologías observadas en el hormigón (probablemente microorganismos) bien como cristales corroídos o elementos de degradación, como ettringita secundaria.

Se sugieren también algunas hipótesis para la presencia de microorganismos en el hormigón, tanto para la identificación de algunos de estos microorganismos observados, como para el tipo de degradación existente en el hormigón.

2. ELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS

Las técnicas utilizadas se eligieron en función de lo que se pretendía estudiar, es decir la microestructura del hormigón tratando de definir el origen de los problemas que causarían los defectos visibles de las estructuras.

De este modo fueron definidas las siguientes técnicas:

- Microscopía electrónica de barrido, con el fin de observar principalmente el gel formado en la reacción árido-álcali, la cual se pensaba que había en función de la apariencia de las fisuras existentes en algunas piezas de donde fueron retiradas las muestras estudiadas.
- Análisis químico elemental completo (de filtrado de ataque nítrico y del residuo insoluble), cuyos resultados se destinaban a hacerse una idea de la composición química del hormigón como para proceder al cálculo mineralógico.
- Análisis térmico: análisis térmico diferencial, para determinar algunas fases del hormigón y la presencia de materia orgánica.

of the characteristic gel can only be detected by this technique.

In this paper, the scanning electronic microscope (SEM), together with other types of analysis and complementary calculation have been used. This permitted the detection of the absence of ASR, in addition to the analysis of structural problems.

Many different concrete morphologies were observed and some of the most interesting will be shown including those which are probable microorganisms, as well as some corroded crystals and deterioration products (as secondary ettringite).

Some hypotheses are suggested, for the presence of microorganisms in concrete, as well as for the existing degradation in concrete.

2. CHOICE OF TECHNIQUES

The concrete microstructure is a way to define the origin of the problems which are responsible for the visible defects in structures.

In view of this, the following techniques have been chosen:

- *SEM, for the texture observation mainly of the presence of the gel, result of the ASR, which was expected, because of the cracks observed in certain parts of some of the structures analysed, from which the samples have been collected.*
- *Elementary chemical analysis (of the filtrate of nitric acid attack and the remainder). These results were used, not only to give an idea of the chemical composition of the concrete, as well as data for the mineralogical calculation.*
- *Thermal analyses: Differential thermal analyses have been carried out, in order to determine some of the concrete phases, as well as the presence of organic compounds.*

- Análisis termogravimétrico, para verificación de la repartición de agua existente en el hormigón.
- Difracción de rayos X, para identificar las diferentes fases cristalizadas del hormigón.
- Cálculo mineralógico, el cual, a través de un sistema de ecuaciones resuelto por iteración, estima varios parámetros del hormigón como, por ejemplo, su contenido en cemento, contenido y tipo de áridos, composición química del cemento y si el cemento es tipo portland o no.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS Y DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Las muestras provenían ya hace algún tiempo de estructuras en servicio, y presentaban una degradación aparente (como por ejemplo: fisuración intensa, armadura seriamente oxidada y dejada a la vista por el desprendimiento del recubrimiento del hormigón) y otras muestras aparentaban estar sanas.

Todos los hormigones fueron recolectados en Brasilia donde el clima presenta características bastante peculiares: hay una gran variación higrométrica, incluso en lapsos cortos de tiempo, y la temperatura es relativamente estable.

Una idea de las variaciones climáticas viene dada en los gráficos de las figuras 1 y 2, donde se puede verificar que en el período 1963 a 1987 (época de construcción y tiempo de vida de la mayoría de las estructuras) la media de las temperaturas está dentro del intervalo 20 a 25° C, mientras que la higrometría varía del 60 al 78 %, con un mínimo que puede llegar a veces hasta el 12 %.

Las muestras fueron retiradas de varias obras cuya edad variaba entre 7 y 30 años, localizadas en varios puntos de la ciudad y constituidos por diferentes tipos de hormigón (pretensado y armado), morteros de reparación y estalagmitas, situadas en un ambiente variado (parte interna del edificio, subsuelo, local bastante batido por el viento, proximidad del lago, etc.).

La toma de muestra se efectuó en las partes degradadas y no del hormigón, retirándose las muestras con golpes de martillo o manualmente cuando esto era posible.

Los defectos aparentes del hormigón se presentaban en forma de fisuraciones (bastante intensas algunas veces), de desprendimiento de

- *Thermogravimetric analyses have been accomplished, in order to verify the water phases in concrete.*
- *Chrystalised phases of concrete have been identified by X-ray diffraction.*
- *Mineralogical calculation, gives, through a system of equations, solved by iteration, different information about the concrete, for example, the cement content, aggregates content and type, chemical composition of cement and if the cement used is a standard portland cement or not.*

3. DESCRIPTION OF SAMPLES AND ENVIRONMENT CONDITIONS

All of the samples come from aged structures, and presented apparent degradation (for example intensive cracking, too much oxidized reinforcing bars, visible under detached plates of concrete) and from apparently good concrete.

All the concrete samples have been collected in Brasilia, where the climate is very peculiar: the humidity varies over a large range, even during short time intervals, but the temperature is relatively stable.

An idea of the climatic variation is given in figures 1 and 2, where it can be seen that between 1963 and 1987 (from the time of construction of most of the structures analysed), the average temperature is between 20 and 25°C. The average humidity varies from 60 to 78 % and the minimum is as low as 12 %.

The samples were collected from structures aged from 7 to 30 years, located in different sites of the city and formed by several types of concrete (prestressed or reinforced), mortar for repairing concrete and stalactite, placed in variable ambencies (internal or external parts of buildings, underground, very windy environments, proximity of the lake etc.).

The samples have been taken from degraded and undamaged concrete.

The defects visible in the concrete were: cracks (sometime very frequent), detached concrete plates over the oxidized reinforcing bars (Fig. 3),

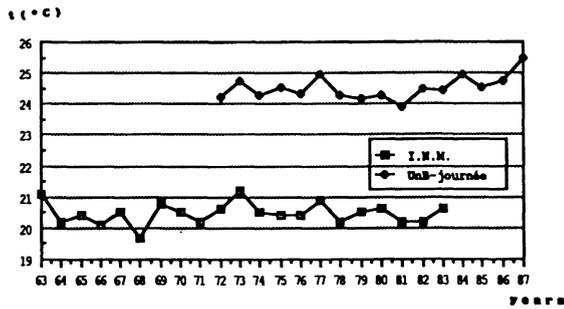


Fig. 1.—Gráfico de variación de las medias mensuales de temperatura durante el período 1963 a 1987.

Fig. 1.—Graph of monthly average variation of temperature (°C) from 1963 to 1987.

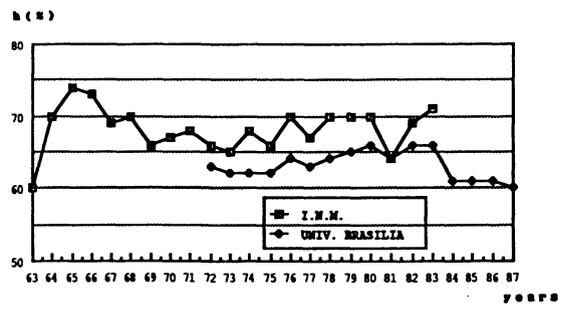


Fig. 2.—Gráfico de variación de las medias mensuales de higrometría en Brasilia durante el período 1963 a 1987.

Fig. 2.—Graph of monthly average variation of humidity (%) in Brasilia.

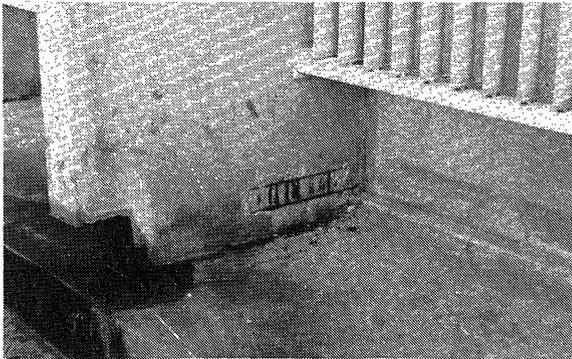


Fig. 3.—Aspecto de uno de los pilares cuyo hormigón se ha debilitado internamente cayendo en placas que dejan a la armadura completamente oxidada. En el extremo del pilar, en la salida del agua, el hormigón se presenta sin cohesión y con su interior alterado.

Fig. 3.—Aspect of one of the columns where the internal weak concrete splits, leaving the very oxidized reinforcing bars. At other column edge, at the water exit, the concrete has no cohesion and its colour is altered.

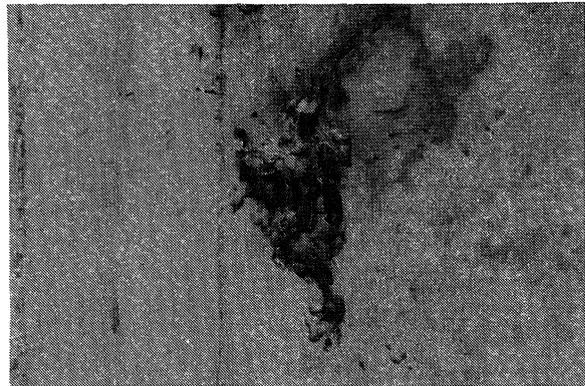


Fig. 4.—Vista del defecto de ejecución del muro de contención del suelo. Se puede observar la reparación ya ejecutada sin éxito, habiéndose desprendido parcialmente.

Fig. 4.—View of the execution of the soil contention wall. Note the unsuccessful repair, that stays only partially in place.

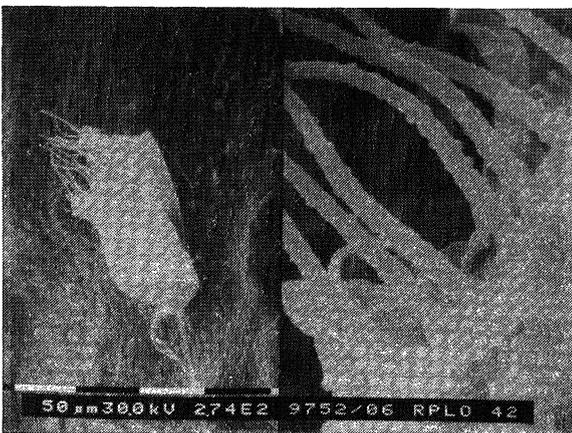


Fig. 5.—Morfología encontrada en el hormigón con apariencia extraña al medio.

Fig. 5.—Morphology found in concrete, unusual in this environment.

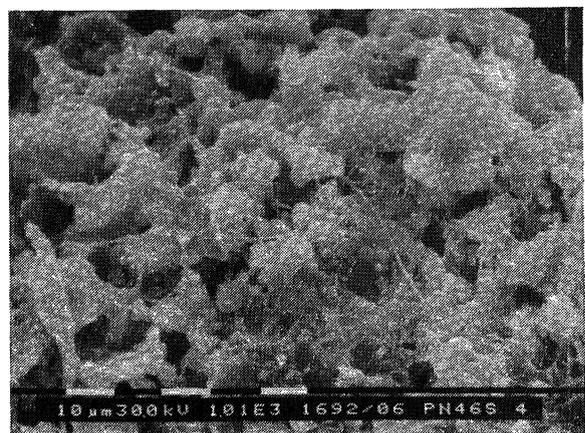


Fig. 6.—Forma semejante a esponjas junto a la especie de tubos huecos variados encontrados en el pilar del que se desprendían las placas superficiales.

Fig. 6.—Aspect similar to sponges, showing a kind of empty sheath, found in the columns, with detached plates of concrete.

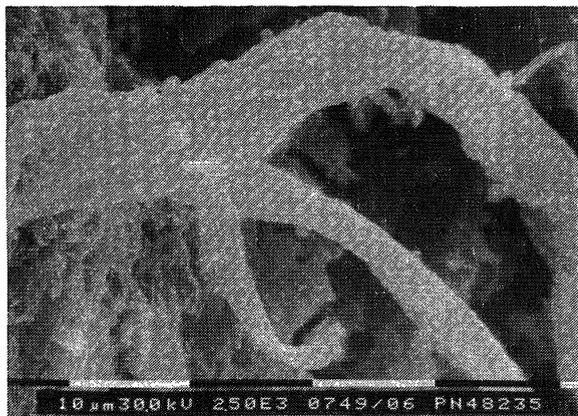


Fig. 7.—Morfología bastante extraña, de textura irregular, de la cual salen una serie de tentáculos de extensiones variadas.

Fig. 7.—Very unusual morphology, with an irregular texture, with a kind of tentacles of different lengths.

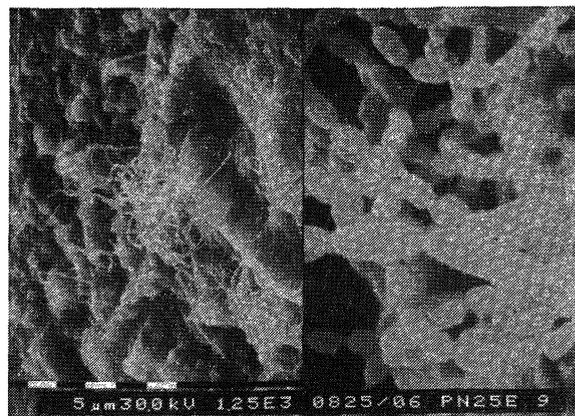


Fig. 8.—Este tipo de cadena se encontró muy frecuentemente, y está formada por células cortas y alargadas, probablemente esporas de hongos.

Fig. 8.—Very frequent, this kind of chain, formed by long and short cells, probably spores of fungus.

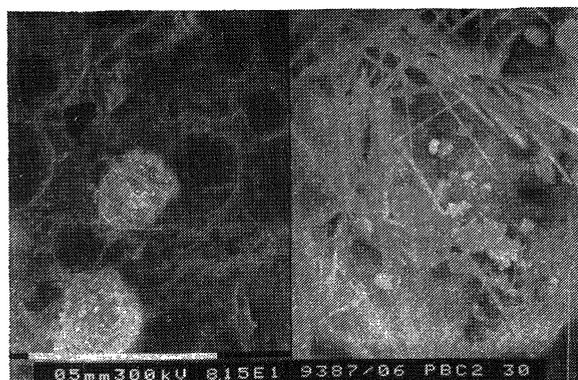


Fig. 9.—Etringita secundaria observada en el hormigón, aquí localizada dentro de los poros.

Fig. 9.—Secondary ettringite observed in concrete, here placed inside the pores.

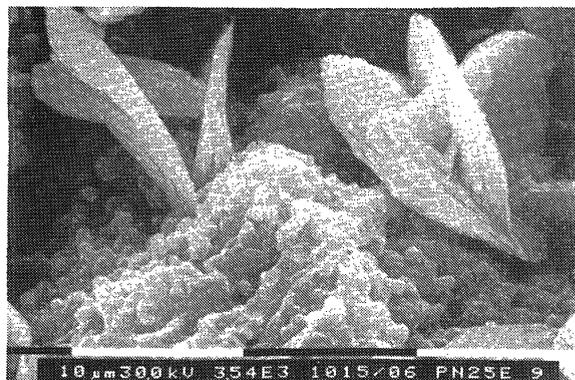


Fig. 10.—Morfología de thaumasita encontrada en el hormigón.

Fig. 10.—Morphology of thaumasite found in concrete.

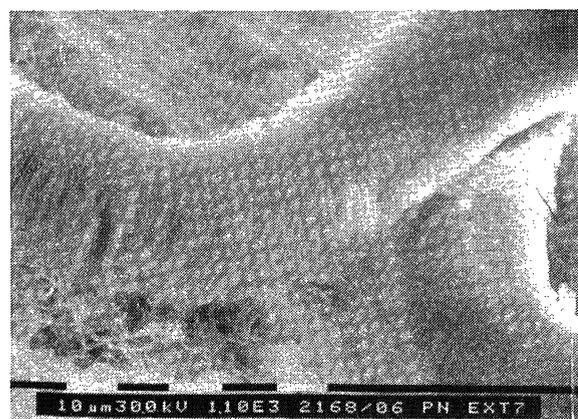


Fig. 11.—Formación, bastante diferente, conteniendo cloro y encontrada en uno de los hormigones estudiados. La estructura está formada por plaquetas yuxtapuestas.

Fig. 11.—Very unusual form, containing chlorine and found in one of the concrete samples studied. The structure is formed by little plates, pasted each to the other.

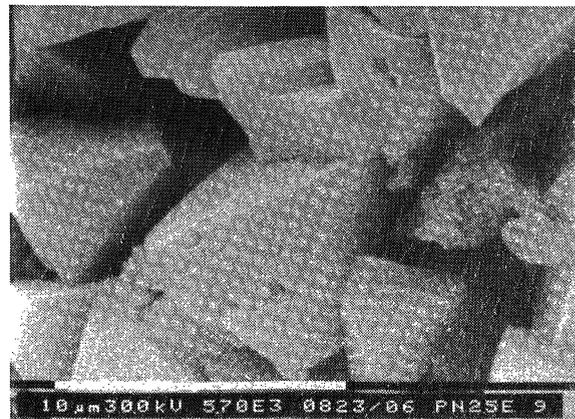


Fig. 12.—Carbonato de calcio corroído, observado sobre un árido silíceo.

Fig. 12.—Corroded calcium carbonate, observed over a siliceous aggregate.

láminas de hormigón sobre las armaduras oxidadas (Fig. 3), de presencia de estalagmitas de rotura por choque mecánico así como defectos constructivos (Fig. 4) etc.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

El conjunto de las técnicas aplicadas en este estudio permitió obtener una serie de resultados de análisis y observaciones microscópicas, las cuales muestran diversos tipos de alteración del hormigón, visibles en sus microestructuras (1).

Sorprendentemente, sin embargo, fue la ausencia de cualquier tipo de gel característico de la reacción ácido-álcali, a pesar de que la forma de la fisuración existente, principalmente en algunas estructuras, hacía pensar en principio como evidente este tipo de degradación.

La presencia masiva de áridos y la baja proporción de aglomerante fueron observadas a través de los resultados obtenidos por la difracción de rayos X. También algunos productos de degradación fueron detectados.

A través de las observaciones microscópicas fue posible detectar que la mayoría de las muestras contenía morfologías variadas extrañas al hormigón (Figs. 5, 6, 7 y 8) y cuya composición química variaba bastante. Más tarde fue hecha una aproximación de algunas de estas formas con microorganismos.

También, por la misma técnica, se identificó una serie de elementos, productos de degradación del hormigón como es el caso de la ettringita secundaria (Fig. 9), de la taumasita (Fig. 10), de compuestos conteniendo cloro (Fig. 11) y algunas conteniendo sodio, así como otros menos frecuentes.

El análisis elemental de la zona (en el punto observado) a través de espectrometría de dispersión de energía, mostró la evidencia de un exceso de álcali (potasio y sodio, este último en menor cantidad) y una acción sulfática sobre el hormigón.

Los análisis químicos permitieron observar diversos tipos de anomalías, como por ejemplo: ausencia de óxido de aluminio en diversas muestras y exceso de álcali (de potasio y de sodio) en algunos hormigones.

Los análisis térmicos mostrarán una existencia de materia orgánica en algunos hormigones.

presence of stalactite, degradation by mechanical shock and other kinds of construction defaults (Fig. 4).

4. RESULTS OBTAINED

Using all of the techniques mentioned, results have been obtained in this study, showing many types of alteration in the concrete, visible in its microstructure (1).

The absence of ASR is surprising, even if the existing crack aspect in some structures, seemed very similar to those characteristic of this kind of degradation.

The great concentration of aggregates and the weak content of cement have been observed through X-ray diffraction. Besides, some degradation products have also been detected. Thermal analyses have shown the existence of organic material in most of the concretes samples.

Through microscopic observation, it has been possible to note that the great majority of samples contained different types of morphologies, completely different from the concrete microstructure (Figs. 5, 6, 7 and 8), with varied chemical composition. Later, a comparison of some of these forms with microorganisms was carried out.

The same technique allowed the identification of degradation products, as ettringite (Fig. 9), thaumasite (Fig. 10), chlorine compounds (Fig. 11), some containing sodium and etc.

The elementary analysis of the zone (or observed point), through the spectrometry of energy dispersion, put in evidence an alkali excess (potassium and sodium, this last not so frequent) and a sulfatic action in the concrete.

Chemical analyses allowed the observation of some anomalies such as: absence of aluminium oxide in many samples and excess of alkali (potassium and sodium) in several ones.

The thermal analyses showed the presence of organic compounds in some samples.

Completando el estudio, el cálculo mineralógico condujo a las siguientes observaciones: la mayoría de los hormigones no permitía cuadrar el cálculo, es decir se presentaba alguna anomalía mineralógica ya que casi todos los hormigones contenían una cantidad de sílice incompatible con la composición de un cemento y, de su respectiva proporción en el hormigón, era indudable la presencia de productos de degradación del hormigón; se constató también que en una parte notable de muestra la sílice había desaparecido.

Los resultados más inesperados fueron los de las observaciones microscópicas, donde fue posible constatar que, además de la presencia de microorganismos, diversos cristales del hormigón se mostraban corroídos. La aparición de estas dos observaciones simultáneas condujo a considerar una interacción entre ellas (1).

Los componentes del hormigón más frecuentemente corroídos fueron: carbonatos de calcio (Figs. 12 y 13), portlandita (Figs. 14 y 15), mica (Figs. 16 y 17), monosulfoaluminatos de calcio (Fig. 18), granulado silicoso (Fig. 19) y feldespato (Fig. 20).

Se hizo un intento de identificación de los microorganismos con auxilio de especialistas que investigaron la acción de estos microorganismos sobre minerales del suelo (2).

Entre tanto fue imposible hacer un reconocimiento usando sólo el factor semejanza entre morfologías para identificar las formas extrañas al hormigón.

Otro hecho para el que no fue posible encontrar una explicación clara fue cómo esos microorganismos llegaron a la superficie del hormigón.

En el caso especial de los hormigones de Brasilia, algunos microorganismos permanecen en la superficie y otros penetran hasta el interior. Según Bock (3), son normalmente transportados por el viento y llevados al interior del hormigón por el agua.

En uno de los pilares estudiados se cogieron dos muestras, una de la parte inferior de la pieza en la zona que estaba degradada y otra de una parte aparentemente sana (en la parte superior del pilar).

La explicación encontrada, para la diferencia de comportamiento, es que en la parte interior la vegetación impide que el propio viento retire los microorganismos traídos por él, mientras que en la parte superior, donde no hay protección, los

To complete the study, a mineralogical calculation leads to the following observations: in most samples, it has not been possible to equilibrate the mineralogical calculation, this signifying the presence of some mineralogical anomaly; almost all samples contained an incompatibility between its silica content and the cement composition. The presence of different concrete degradation products is incontestable. It has been noted also, that, in a great number of samples, part of the silica has disappeared.

The most unexpected results have been observed under the microscope, where it has been possible to verify that besides the presence of microorganisms, in their proximity, many concrete crystals were corroded. The frequency of these elements near the microorganisms leads to a comparison between these two elements.

The most frequent observed corroded concrete compounds are: calcium carbonate (Figs. 12 and 13), portlandite (Figs. 14 and 15), mica (Figs. 16 and 17), calcium monosulfoaluminate (Fig. 18), siliceous aggregate (Fig. 19) and feldspars (Fig. 20).

An attempt at microorganisms identification has been made, with the aid of specialists in microorganism action on soil minerals (2).

However, it has been impossible to obtain complete recognition. The strange forms found in the concrete have been identified only by morphological similarity.

Another fact, which could not be clearly explained, is how these microorganisms came to be at the concrete surface. According to Bock (3), they normally come transported by the wind and penetrate into concrete, carried by water.

In the case of concrete from Brasilia, there are some microorganisms which remain at the surface and others that penetrate to the interior of the material.

In one of the structural columns, two samples have been collected: one from the deteriorated site (in the interior of the plate) and another from an apparently sound part of the concrete (upper part of the column).

The explanation found for the different behaviour is that at the lower part, the vegetation obstructed the wind action, not allowing the retreat of the microorganisms. In the upper part, as there is no protection, the microorganisms can be taken away

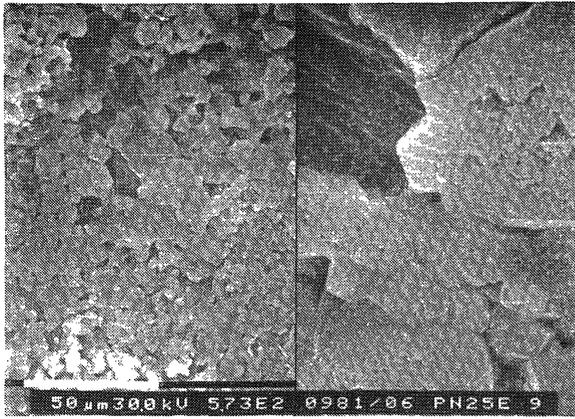


Fig. 13.—Otro aspecto de carbonatos de calcio corroídos localizados dentro de un poro.

Fig. 13.—Another aspect of corroded calcium carbonates, placed in a pore.



Fig. 14.—Placas de portlandita degradadas, junto a las cuales se han observado hilos que vistos con un aumento mayor muestran una morfología formada por células en cadenas.

Fig. 14.—Degraded portlandite plates, near to strings, which are really formed by cells, as in a chain.

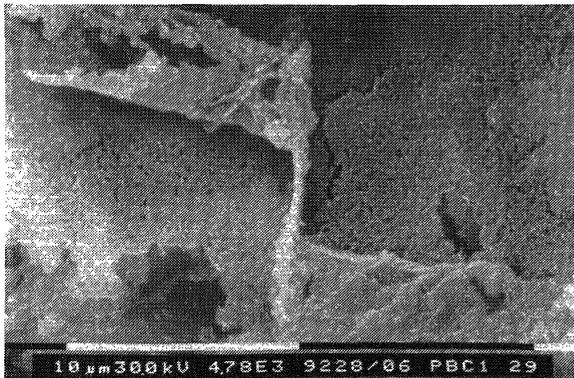


Fig. 15.—Cristales de portlandita corroídos encontrados en una variedad del hormigón, en cuyo fondo se puede encontrar carbonato de calcio degradado.

Fig. 15.—Corroded portlandite crystals, found in a pore, in the concrete. Under them, degraded calcium carbonate can be observed.

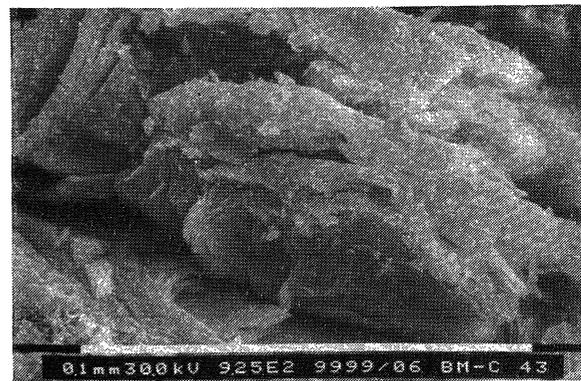


Fig. 16.—Mica biotita (Fe) degradada, muy frecuente en todas las muestras estudiadas.

Fig. 16.—Degraded biotite mica (Fe), very frequent in all studied samples.

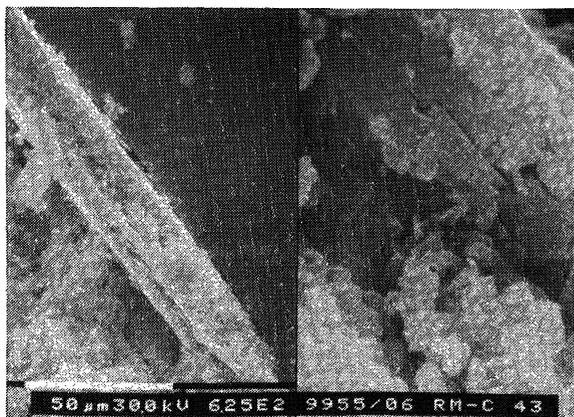


Fig. 17.—Muscovite mica in degradation state, near to a siliceous aggregate.

Fig. 17.—Muscovite mica in degradation state, near to a siliceous aggregate.



Fig. 18.—Cristales de monosulfato de calcio corroído.

Fig. 18.—Corroded calcium monosulfate crystals.

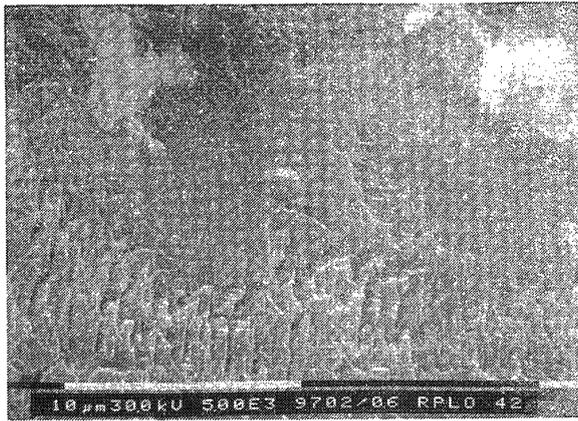


Fig. 19.—Granulado silíceo deteriorado por disolución.

Fig. 19.—Siliceous deteriorated by dissolution.

microorganismos pueden ser llevados por el viento que los condujo hasta la superficie del hormigón.

5. CONCLUSIONES

Dos factores se observarán con sorpresa en el estudio de los hormigones de Brasilia: la ausencia de reacción árido-álcali y la presencia de una acción microbiana sobre el hormigón.

El primer hecho se puede explicar de dos maneras: la influencia benéfica de los ciclos de higrometría, los cuales no permanecen tiempo suficiente para que la reacción se desarrolle, una vez que ésta puede manifestarse a largo plazo. Como durante la época seca la higrometría es bastante baja, no hay la humedad necesaria, y como la estación de las lluvias no es suficientemente larga, la reacción no llega a un estado perjudicial para el hormigón.

La otra explicación se refiere a la presencia de microorganismos, los cuales son responsables de la producción de un ataque ácido de los productos calcáreos, modificando así el pH del hormigón. Sabiendo que la reacción árido-álcali sólo se manifiesta en medios altamente alcalinos, es muy probable que sea éste el motivo de la inhibición de la reacción.

La acción de los microorganismos sobre el hormigón no es todavía conocida. Se puede establecer un paralelismo entre lo que ocurre en el hormigón y lo que ocurre en las piedras de los monumentos históricos, cuyo estudio ya se viene desarrollando desde hace algún tiempo con resultados que permiten llegar a observaciones más concluyentes (3, 4).

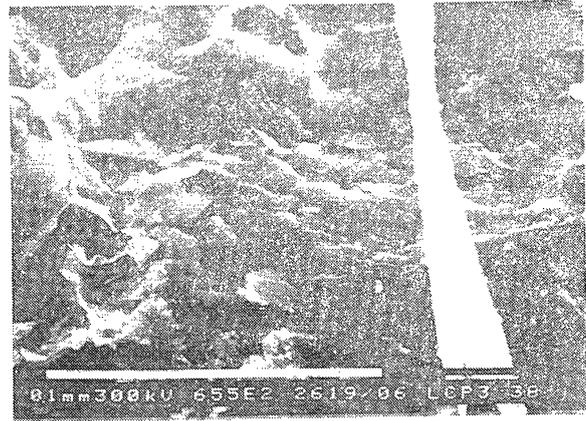


Fig. 20.—Aspecto de feldespato degradado sobre el cual se ve un filamento, probablemente un tubo hueco.

Fig. 20.—Aspect of degraded feldspar. Over it, a filament, probably a sheath, can be seen.

by the wind, after being conducted to the concrete surface.

5. CONCLUSIONS

Two surprising facts have been observed in this study of the concrete from Brasilia: the absence of the ASR and the presence of a microbial action over the concrete.

The first can be explained in two ways: the beneficial influence of the humidity cycles, which do not remain sufficient time for the development of a reaction, given that this can take a long time to appear. In the dry season, the humidity decreases significantly, and the rainy season is not sufficiently long for the reaction to damage the concrete.

Another explanation is that the presence of microorganisms, responsible for an acid attack over calcareous products, modifies the concrete pH. As is well known, the ASR appears only in very alkaline environment, which it is another probable cause of the reaction inhibition.

The action of microorganisms over the concrete is not yet well known. It is possible, however, to make an estimate of this action observing what occurs in the case of historical monuments which employ stones in their construction. This study began some time ago, with results that lead to conclusive observations (3, 4).

Se debe pensar en proteger al hormigón contra este tipo de degradación. Se puede pensar por ejemplo en impedir que el proceso se desarrolle, evitando alguna condición necesaria o aplicar posteriormente una sustancia que impide la evolución, sea matando los microorganismos sea impidiendo su desarrollo.

6. RECONOCIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento a la Dra. Carmen Andrade y al Prof. Antonio Alberto Nepomuceno, por su valiosa colaboración en la traducción de este trabajo.

It is also necessary to consider concrete protection against this kind of deterioration. It is possible, for example, to avoid the development process and eliminate some of the conditions necessary for the phenomenon to develop or to apply later a substance that blocks their action, killing the microorganisms or inhibiting its development. It is essential to avoid the use of substances that could damage the concrete.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The author is very grateful to Professor Paul Partridge for his help with the correction of the translation to English.

REFERENCIAS

- (1) RIBAS SILVA, Moema: Étude de la microstructure du béton sous l'influence de variations hygrométriques importantes. Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Grenoble: ANST, 1990. 210 p.
- (2) BERTHELIN, Jacques: Microbial weathering process in natural environment. In: PHYSICAL AND GEOCHEMISTRY. Ed. by W.E. Krumbein. Oxford: Blackwell Scientific Publishers B.V., 1988. p. 223-262.
- (3) BOCK, E.: Biologisch induziert Korrosion von Naturstein-starker befall mit nitrification. BAUTENSCHUTZ BAUSANIERUNG. Special edition. p. 42-45. Tranl. S. Proeschel.
- (4) KRUMBEIN, Wolfgang: Biogene Krunsten. BAUTENSCHUTZ BAUSANIERUNG. Special edition. p. 61-64. Transl. S. Proeschel.

* * *

publicación del ICCET/CSIC

ACUEDUCTOS ROMANOS EN ESPAÑA

Carlos Fernández Casado

Prof. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Esta publicación se compone de una serie de artículos, publicados en la Revista «Informes de la Construcción», en los cuales se hace un análisis de los acueductos romanos que existen en España y el balance de las condiciones de conservación en que se encuentra cada uno de ellos, incluyendo referencias históricas y literarias. Se ha ilustrado con la reproducción de la valiosa documentación gráfica que posee el prestigioso autor.

Un volumen encuadernado en couché, a dos colores, de 21 x 27 centímetros, compuesto de 238 páginas, numerosos grabados, dibujos, fotos en blanco y negro y figuras de línea.

