611-109

Estudio de un cemento de las ruinas de Teotihuacan

A. GOLDSCHIMDT* y R. CAMARGO**

RESUMEN

Se estudió un mortero de cemento portland de aproximadmente 30 años expuesto a la intemperie y otro mortero de las ruinas de Teotihuacan, mediante Microsonda (EM) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Mostrándose la diferencia entre ambos morteros y evidenciando la semejanza, del de Teotihuacan —cuya edad es anterior a la conquista del Imperio Azteca— con el mortero puzolánico Romano.

INTRODUCCION

Antes de que Joseph Aspdin (1824) descubriera el cemento portland, se usaba en las construcciones el cemento romano, que gozó de gran prestigio durante mucho tiempo y consistía en la mezcla de cal y puzolana, empleándose un 45 % de la primera y el resto de puzolana.

Otro tipo de cemento que conocemos a través de la Historia es el azteca, habiendo al parecer variedades de ellos: el Sagrado que se usaba en la reparación de los Teocalli, que consistía en cal y sangre (1) y el de las contrucciones (2) de cal, piedra y tierra.

El presente trabajo tiene por objeto, comparar un cemento portland de 30 años de antiguedad y expuesto a la intemperie, con uno extraido del pavimento de las ruinas de Teotihuacan en México, el cual data de antes de la conquista del Imperio Azteca por Hernán Cortés.

PREPARACION DE LAS MUESTRAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Se extrajo un mortero de cemento portland, de una construcción expuesta a la intemperie y de una edad de 30 años, cuya composición original es de 19,25 % S; 63,77 % C; 5,55 % A; 2,88 % F; 2,86 % S; 1,97 % M; 1,01 % K; 0,65 % T; 0,61 % Ni; 0,1 % P***.

* Laboratorio de Microanálisis, Depto. de Geología, Casilla N.º 13518, Correo 21, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

** Laboratorio de Microscopia Electrónica, Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales (IDIEM), Universidad de Chile, Santiago, Chile.

*** En la química del cemento la nomenclatura es: CaO = C; S = SiO_2; A = Al_2O_3; F = Fe_2O_3; $\overline{S}$ = SO_3; K = K_2O; M = MgO; N = Na_2O; T = TiO_2; P = P_2O_5; H = H_2O; $\overline{C}$ = CO_2.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

El mortero antiguo se extrajo de los pavimentos de las ruinas de Teotihuacan cerca de la ciudad de México. Al igual que el cemento portland se prepararon muestras de éste, para ser examinadas mediante un microscopio de Barrido Siemens (SEM) una Microsonda (EM) Cameca # 46 y un Microscopio de Reflexión (MOR).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En lo que respecta al cemento portland ya mencionado, la observación mediante microscopía óptica, nos muestra en general (fig. 1), una masa fundamental, con cristales de diversos tamaños, que al ser analizados con microsonda revelan tener en su mayoría, Ca sin otros elementos pesados, lo que supone que se trata de CH que al contacto atmosférico se combina con $\overline{C}$ para dar $C\overline{C}$* (3). La masa fundamental revela la presencia de fases que se producen al endurecer el cemento portland (4) CHS**, C_4AH_{13} y C_6AFH_{12} (5), las que son poco solubles. Se identificaron con microsonda.

Fig. 1.—Superficie de un mortero de cemento portland de 30 años expuesto a la intemperie. Los cristales claros originalmente de CH, se han combinado con el $\overline{C}$ para formar $C\overline{C}$. Microscopía de Reflexión (MOR).

Fig. 2.—Los cristales de la Fig. 1 magnificados. Nótese su superficie sin rayas. Microscopía de Barrido (SEM).

La Fig. 2 de microscopía de Barrido (SEM) nos muestra los cristales que la microsonda detectó como Ca sin Si y la masa fundamental que los rodea; al observar el mortero de Teotihuacan con microscopía de reflexión la Fig. 3 nos muestra cristales más grandes que los observados en el mortero de cemento portland y en menor cantidad, repartidos en la masa fundamental. El análisis de ellos con microsonda nos reveló presencia de ilmenitas (TiO_3Fe) y arcillas (silicatos de aluminio).

---

* $CH + \overline{C} \rightarrow C\overline{C} + H$.

** Aunque las proporciones de S, C, H son variables adaptamos en este caso la nomenclatura SCH.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

La Fig. 4 de microscopía de Barrido nos muestra uno de estos cristales más en detalle, pudiéndose observar fisuras en él, lo que nos indica que es un material más blando, que los observados en Fig. 1, 2. El análisis químico en la masa fundamental nos revela la presencia de Si, Al, Ca, en diferentes proporciones, las que no corresponden a fases características de un cemento portland. Ej. Ca/Si = 0,17; Ca/Al = 2,76; Si/Al = 16,18. A diferencia del cemento portland no se encontró ningún cristal que tuviera Ca solamente; sólo se identificaron pequeños cristales de ilmenita de un tamaño de un micron.

Fig. 3.—Superficie del cemento de las ruinas de Teotihuacan. Destancándose los cristales de ilmenita y arcillas. Microscopía de Reflexión (MOR).

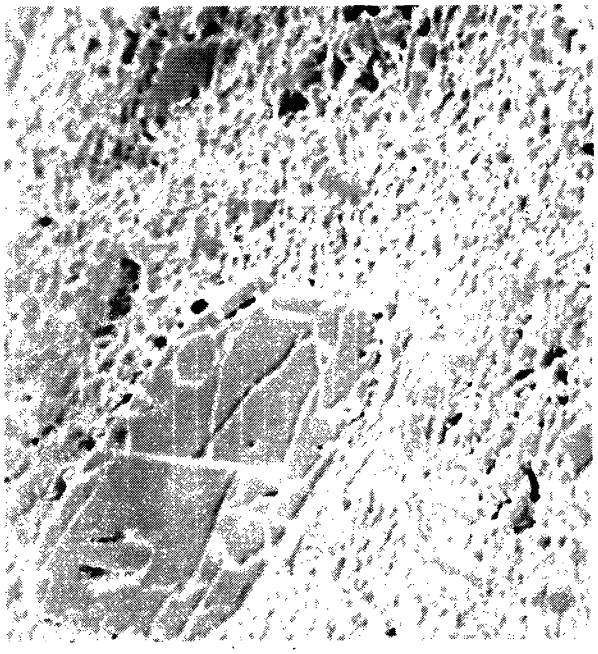

Fig. 4.—Superficie del cemento de las ruinas de Teotihuacan, en donde se destaca un cristal de arcilla. Nótese su superficie fisurada. Microscopía de Barrido (SEM).

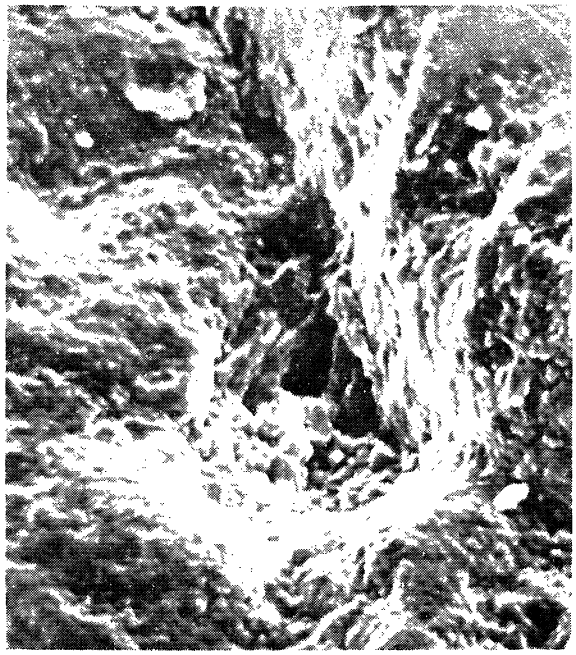

Fig. 5.—Interfase corroida cemento-agregado del cemento de Teotihuacan. Obsérvese la diferencia morfológica con el de la Fig. 6. Microscopía de Barrido (SEM).

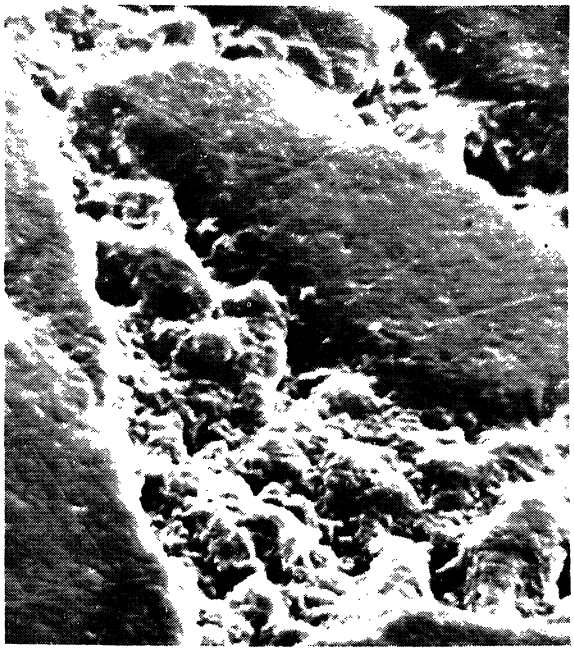

Fig. 6.—Interfase cemento-agregado corroido de mortero de cemento portland de 30 años y expuesto a la intemperie. Nótese la diferencia morfológica con el de la Fig. 5. Microscopía de Barrido (SEM).

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

La morfología de la interfase árido-cemento se muestra en las Figs. 5 y 6, correspondiendo la primera al de Teotihuacan y la segunda al de cemento portland, como se puede apreciar son diferentes. En la primera hay una combinación en la interfase cemento-árido (cerámica molida) y en el segundo no. Por último un análisis de distribución (Figs. 7, 8, 9) en la masa del cemento azteca, de Si, Ca y Al, nos muestra que no hay correlación entre el Si y el Ca como debería ser si estos elementos provinieran del producto de hidratación del C_3S y C_2S. Podemos en cambio observar en Figs. 8 y 9 una correlación Si, Al.

Fig. 7.—Distribución del silicio en la masa fundamental del cemento de Teotihuacan. Fotografía de distribución con Microsonda (EM).

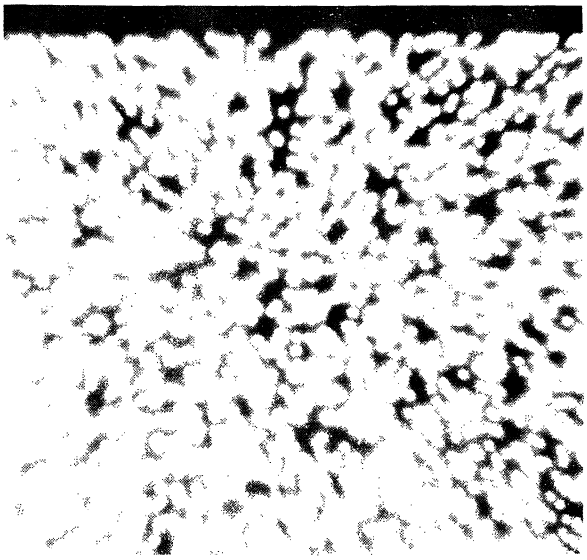

Fig 8.—Distribución del Ca en la misma zona de la Fig. 7. Nótese la no correlación del Si y Ca. Fotografía de distribución con Microsonda (EM).

DISCUSION

Si consideramos las reacciones de un cemento portland con agua (5):

a) $2\,C_3S + 5{,}5\,H \rightarrow C_3S_2H_{2,5} + 3\,CH$

b) $2\,C_2S + 3{,}5\,H \rightarrow C_3S_2H_{2,5} + CH$

c) $C_4AF + 10\,H + 2\,CH \rightarrow C_6AFH_{12}$

d) $C_3A + 12\,H + CH \rightarrow C_4AH_{13}$

e) $C_3A + 10\,H + C\overline{S}H_2 \rightarrow C_3AC\overline{S}H_{12}$

En las dos primeras ecuaciones se muestra que el C_3S y el C_2S reaccionan con el agua para formar CHS más CH. Este último visible en las figuras 1 y 2 pero ya transformado en $\overline{C}C$. Es decir, un cemento portland ya hidratado, se caracteriza por la presencia de grandes cristales de CH.

El análisis con microsonda de los cristales (Figs. 1 y 2) fue elocuente. En cambio de los resultados experimentales del cemento de Teotihuacan no se apreciaron dichos cristales de CH o $C\overline{C}$ (Figs. 3 y 4); éstos se identificaron como ilmenita y arcillas, con lo que se desprende que es un cemento diferente al portland. Si tomamos en cuenta (1) y (2) y que en el antiguo México se conocía la cal y si consideramos (3) que los cementos primitivos, en Grecia y Egipto, eran usados como adhesivos entre ladrillo y piedras y que la gran

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

calidad de este cemento era debido a la cal mezclada con un material silíceo reactivo (en forma de cerámica molida o cenizas volcánicas) (3) y que, además, por otra parte, la interfase del cemento-agregado del de Teotihuacan muestra una interacción que demuestra la acción puzolánica, podemos inferir que el cemento del mortero de Teotihuacan era puzolánico. Por otra parte observando en las Figs. 7, 8 y 9 el análisis de distribución del silicio, el calcio y el aluminio, en la masa del cemento de Teotihuacan observamos que existe correlación entre el Si y el Al, lo que nos hace inclinarnos, a que este cemento del tiempo anterior a la conquista del imperio Azteca por Hernán Cortés, era hecho mezclando cal con cerámica molida al igual que algunos cementos romanos.

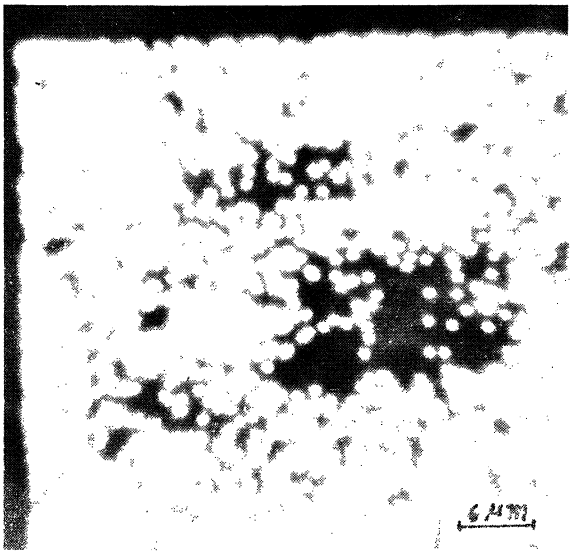

Fig. 9.—Distribución del Al en la zona de la Fig. 8. Nótese la mayor concentración del Al-Si. Fotografía de distribución con Microsonda (EM).

AGRADECIMIENTOS

A P. Kittl por sus sugerencias y aporte de las muestras; a M. Ramos, del Laboratorio de Microscopía Electrónica de IDIEM por su colaboración en el uso del SEM y por el trabajo fotográfico.

NOTA: Ricardo Camargo, alumno agregado del Instituto Politécnico de la Universidad de Chile, realizó su práctica de título en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del IDIEM.

BIBLIOGRAFIA

(1) OROZCO y BERRA, M.: "Historia Antigua y de la Conquista de México", Vol. IV, pp. 238, México, 1880.

(2) GARCIA, G.: "Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España por Bernal Díaz del Castillo, uno de sus Conquistadores". Unica Edición hecha según el códice autógrafo, México, 2 Vols., 1904.

(3) DOUBLE, D. D. y HELLAWELL, S.: "La Solidificación del Cemento", Scientific American, pp. 62-69, 1977.

(4) KITTL, P., GOLDSCHMIDT, A. y SUCHICITAL, C. T. A.: "A Study of the Evaporation Products of the Liquid Phase of a Cement Paste", 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. II, theme II, pp. 7-11, París, 1980.

(5) BRUNAUER, S. and COPELAND, L. E.: "Chemistry of Concrete", Scientific American, pp. 81-81, Abril 1964.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es