

Conforme a estos resultados, el polvo de sílica es la puzolana más reactiva de los cuatro tipos ensayados. Si es aceptado que la velocidad de hidratación del cemento Portland es la misma con y sin puzolanas, los polvos de sílica reaccionan con toda la cal libre, es decir, el 10.5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el sílice marroquí con el 3.5%, la ceniza volante y la puzolana de Volvic con un 1.5%.

Morteros ISO

La cantidad de cal requerida por las puzolanas en los morteros ISO térmicamente tratados a 80°C , de los cuales las variaciones de resistencia se muestran en la figura 7, ha sido determinada por la difracción de rayos X. La clasificación de las puzolanas es la misma que la que se obtuvo en las pastas de cemento. La figura 8, que representa los patrones de la difracción de los rayos X de los morteros tratados de 40 horas a 80°C , muestra claramente la disminución de intensidad de los picos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los cementos de sílice marroquí y de puzolana de Volvic y la desaparición de esos picos en los cementos mezclados con polvos de sílica.

La reactividad hidráulica de las puzolanas, se determina generalmente por ensayos químicos de fijación de la cal. Se han encontrado buenas correlaciones para algunas cenizas volantes y puzolanas naturales (7, 8) entre los resultados de estos ensayos químicos y las mediciones de las resistencias a la compresión de morteros ISO, pero estos dos ensayos no son siempre concordantes (3, 4). Esto ocurre en el caso de nuestro estudio con el sílice marroquí, la puzolana de Volvic y la ceniza volante (Fig. 7).

- 1.- El sílice marroquí, reacciona rápidamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sin embargo, las resistencias a la compresión de los morteros, son sólo ligeramente mayores que las del cemento mezclado con un 30% de cuarzo inerte.
- 2.- Por el contrario, la puzolana de Volvic que reacciona con mucho menos $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da resistencias comparables a aquéllas obtenidas con el sílice marroquí;
- 3.- La ceniza volante la cual requiere tanto $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como la puzolana de Volvic da resistencias muy superiores, casi iguales a aquéllas correspondientes al cemento Portland.

Estas diferencias pueden relacionarse a la microestructura de los materiales y a la morfología de los silicatos hidratados C-S-H en particular:

- En el mortero de cemento Portland tratado térmicamente, las zonas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ coexisten con la densa cubierta de C-S-H en los granos del clinker (Fig. 9). Los aluminatos están presentes en la forma de cristales de hidrogranate C_3ASH_6 y placas monosulfoaluminatadas (Fig. 10);
- El C-S-H del mortero con sílice marroquí, tiene una estructura alveolar porosa (Figs. 11 y 12). Están presentes pequeñas cantidades de cal hidratada y está parcialmente disuelta (Fig. 13);

- El mortero de la puzolana de Volvic muestra una morfología del C-S-H parecida a la del C-S-H del CPN pero el material aparece menos compacto que el mortero de cemento Portland (Fig. 14);
- El mortero con ceniza volante, es más denso que el mortero con la puzolana de Volvic. Las esferas de las cenizas están cubiertas con una capa gruesa de hidratos (Fig. 15) y uno puede observar una buena adherencia de los granos de la ceniza hidratada con la pasta de cemento Portland.

La observación con el microscopio electrónico de barrido relaciona la compactidad a la textura de los morteros. Están bien demostradas las diferencias entre los hidratos del CPN, la puzolana de Volvic, el sílice marroquí y la ceniza volante. Una confirmación de la relación, microestructura-resistencia a la compresión, está dada por los morteros de polvos de sílica, en los cuales el enlace C-S-H es muy compacto y de una apariencia vítrea en oposición a la fibrosa o reticulada del C-S-H de los otros cementos (Fig. 16 y 17).

Ni portlanizados ni monosulfatoaluminatos fueron detectados.

Conforme a los microanálisis electrónicos de prueba, la relación C/S del C-S-H se encontró igual a 0.9 en los morteros de cementos mezclados con polvos de sílica tratados térmicamente (40 horas a 80°C) e igual a 1.8 en los morteros de CPN tratados bajo las mismas condiciones.

Además, el C-S-H del mortero con polvo de sílica es más alcalino (1.3% K_2O) que el C-S-H del correspondiente CPN (0.5%). Estos resultados confirman los de Traeherberg quien encontró una relación C/S - 1.1 en C_3A hidratado + mezclas de polvo de sílica (9) y de Pilar de Luxan quien detectó potasio en un gel de sílica puzolánica (10) e indicó que además de la actividad puzolánica existe una actividad alcalina (11). Las puzolanas como el polvo de sílica deberán tener un comportamiento aceptable en condiciones ambientales adversas como en la del agua de mar o en soluciones sulfatadas. Este problema se estudia actualmente en nuestro laboratorio. El polvo de sílica podría ser usado en climas fríos debido a su resistencia al congelamiento y deshielo (6) y con agregados reactivos a los álcalis (12).

CONCLUSION

Los ensayos químicos acelerados no siempre predicen las resistencias de los morteros y concretos de cementos puzolánicos, porque la reacción de la puzolana con la cal es solamente la primera parte del proceso puzolánico. La segunda parte, es la formación de hidratos adherentes. El microscopio electrónico de barrido nos muestra que la morfología y la textura de los hidratos puede variar grandemente de un material puzolánico a otro.

A nuestro parecer, las mediciones de las resistencias a la compresión es la estimación más segura de la puzolanidad de un producto ya sea natural o

REFERENCIAS

- 1.- F. MASSAZZA, "Chemistry of Pozzolan Additions and Mixed Cements". Vith Int. Congr. Chem. Cem., Principal Paper, Moscow 1974.
- 2.- U. COSTA end F. MASSAZZA, "Factors Affecting the Reaction with Lime of Pozzolanas". Supplementary Paper, Sec. III, VIth int. Congr. Chem., Moscow 1974.
- 3.- R. SERSALE, "Structure and Characterization of Pozzolanas and Fly Ashes". Principal Report IV-1, VIIth Int. Congr. Chem. Cem., Paris, Vol. I, IV-1/21, 1980.
- 4.- K. TAKEMOTO and U. UCHIKAWA, "Hydration of Pozzolan Cements". Principal Report IV-2, VIIth Int. Congr. Chem. Cem., Paris, Vol. I, IV-2/29, 1980.
- 5.- M. REGOURD et E. GAUTIER, "Behaviour of Cements during Accelerated Setting". (in french). Annales I.T.B.T.P., No. 387, Série Béton No. 198, 83-95, 1980.
- 6.- A. TRÄTTEBERG, "Frost Action in Mortar of Blended Cement with Silica Dust". 1rst Int. Conf. Durability of Building Materials and Components". Ottawa 1978, A.S.T.M. STP 691.
- 7.- M. FAVERDY, F. BRIVOT, A. M. PAILLÈRE et R. DRON, "Appreciation of the Pozzolan Reactivity of Minor Components", (in french). Communication VIIth Congr. Chem. Cement, Paris, Vol. III, IV-36/41, 1980.
- 8.- B. MORTUREUX, H. HORNAIN, E. GAUTIER et M. REGOURD, "Comparison of the Reactivity of Different Pozzolanas", (in french). Communication VIIth int. Congr. Chem. Cement, Paris, Vol. III, IV-110/115, 1980.
- 9.- A. TRÄTTEBERG, "Silica Fumes as a Pozzolan Material", Il Cemento 75, 3, 369-376, 1978.
- 10.- M. PILAR DE LUXAN, "Behaviour of Silica Gel during the Pozzolanicity test", (in spanish). Materiales de Construcción, 161, 1-20, 1976.
- 11.- M. PILAR DE LUXAN and F. SORIA, "Study and Critical Review of the Pozzolanicity Test", Cem. Congr. Res., Vol. 5, 461-480, 1975.
- 12.- H. ASGEIRSSON and G. GUDMUNSSON, "Pozzolan Activity of Silica Dust" Cem. Concr. Res., 9, 2, 249-252, 1979.

Tabla 1.- Análisis químico de las puzolanas (% en peso)

Composición	Puzolanas naturales		Puzolanas artificiales		
	Volvic	Opalo (Marruecos)	Ceniza volante	Francia	Islandia
	0.6	12.2	1.8	3.5	2.5
SiO ₂	54.3	70.5	52.5	89.0	90
Al ₂ O ₃	16.8	2.4	28.2	0.2	-
CaO	6.7	6.8	1.5	0.1	0.4
K ₂ O	2.6	0.3	4.4	2.8	1.4
Na ₂ O	4.5	0.5	0.8	0.4	1.5
MgO	3.4	4.6	1.7	1.8	1.9
Fe ₂ O ₃	8.8	1.3	7.5	0.4	1
C			0.5	1.4	1.3

Fig. 1.- Morteros ISO. Cemento Mezclado (70% CPN No. 1, 30% Ceniza Volante)
 a).- Resistencias a la compresión a 20, 60 y 80°C.
 b).- Curvas relativas de afinidad.

