

ceniza de cáscara de arroz.

No se detectó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libre en la pasta de 28 días. El cemento mostró una resistencia excelente a los sulfatos debido, en vez de pérdida en resistencia a la compresión durante la inmersión de sulfato, a que fue registrada una ganancia del 9%.

La pasta de 28 días de cemento mezclado conteniendo 70% de escoria de alto horno (Fig. 6) que mostró una resistencia excelente a los sulfatos, se comportó de manera similar al cemento con ceniza de cáscara de arroz.

Casi no había poros grandes presentes en la pasta hidratada, aunque la porosidad total (poros  $> 45 \text{ \AA}$ ) fue la más alta entre todos los cementos ensayados (Tabla 2). La relación directa entre resistencia a los sulfatos de un cemento y la pendiente fuerte en la gráfica de distribución del tamaño de los poros en un rango de 500 - 45  $\text{ \AA}$ , probablemente muestra que la presencia de un número más grande de poros pequeños está de alguna manera relacionada con la resistencia mejorada a los sulfatos. Aunque la porosidad total del cemento conteniendo 30% de escoria fue considerablemente menor que la del que se encontró en el ensaye que contenía el 70% de escoria, se encontró en el ensaye que el primero no era resistente a los sulfatos. Se debe notar que el volumen de poros pequeños en el cemento con 30% de escoria fue mucho más pequeña que el que contenía 70% de escoria.

En base a los resultados de ensayos de esta investigación, se propone que la resistencia química de los cementos Portland mezclados resulta principalmente del proceso de refinamiento de poros que a su vez está asociado con las reacciones puzolánicas cuando se elimina el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Suponiendo que el material mezclado y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  son más densos que el C-S-H y otros productos producidos por la reacción puzolánica, es evidente que los poros capilares grandes en la veindad de cristales  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la pasta de cemento Portland hidratada tenderían a ser eliminados y reemplazados por un producto que contenga un volumen grande de poros pequeños cuando un material puzolánico reactivo que posea una superficie específica esté presente en el sistema. El modelo propuesto se ilustra en la Figura 7.

#### CONCLUSIONES

De los exámenes microestructurales y de las pruebas de resistencia a los sulfatos en cementos Portland mezclados que contienen puzolana natural, ceniza volante, ceniza de cáscara de arroz y escoria de alto horno granulada, parece ser que, como un resultado de las reacciones puzolánicas, el refinamiento de los poros resultante en los cementos hidratados está asociado con una mejor resistencia a los sulfatos. Como se encontró que la rapidez de difusión de la solución de sulfato en especímenes de pastas de cemento totalmente sumergidos se redujo considerablemente cuando el volumen de poros grandes, poros  $> 500 \text{ \AA}$ , era pequeño, parece que la resistencia a los sulfatos de cementos mezclados fue controlado por el grado al cual las reacciones puzolánicas habían ocurrido antes de estar expuestas al sulfato, porque esto determinó el grado de conversión de los poros capilares grandes en más pequeños.

Para los cementos Portland mezclados usados en esta investigación, se encontró que la resistencia a los sulfatos de las pastas hidratadas de 28 días era satisfactoria para los cementos que contenían 30% de puzolana natural, 30% de ceniza de cáscara de arroz ó 70% de escoria de alto horno. Las pastas hidratadas de estos cementos muestran excelente refinamiento de poro antes de la inmersión en sulfato. En cambio, el cemento Portland de control, el cemento que contiene 30% de ceniza volante y el cemento que contiene 30% de escoria de alto horno no demostraron suficiente refinamiento de poro a los 28 días de hidratación, y no resultaron ser resistentes a los sulfatos.

Dado que los ensayos para determinar la actividad puzolánica no son siempre confiables, se sugiere que el análisis de la distribución del tamaño del poro ofrece un buen método para acertar la actividad puzolánica con el propósito de predecir el comportamiento del cemento Portland mezclado.

#### REFERENCIAS

- 1.- F. Massazza and U. Costa, "Aspects of Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements", *Il Cemento*, V. 76, pp. 3-18, Jan-March 1979.
- 2.- P. K. Mehta, "Evaluation of Sulfate Resisting Cements by a New Test Method", *J. American Concrete Institute*, V. 72, No. 10, pp. 573-575, 1975.

Tabla 1.- Análisis químico de los materiales puzolánicos

% Oxidos	Puzolana natural	Ceniza volante	Ceniza de cáscara de arroz	Escoria de alto horno granular
SiO <sub>2</sub>	65.1	54.3	84.5	34.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.5	25.7	-	12.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	7.9	-	0.8
CaO	3.0	4.0	-	41.3
MgO	1.1	2.0	-	9.6
SO <sub>3</sub>	0.7	0.3	-	-
K <sub>2</sub> O	2.6	2.3	1.0	-
Na <sub>2</sub> O	3.9	0.8	0.3	-
LOI	3.5	1.7	14.0	1.0

CONCLUSIONES

De los exámenes microestructurales y de las pruebas de resistencia a los sulfatos en cementos Portland mezclados que contienen puzolana natural, ceniza volante, ceniza de cáscara de arroz y escoria de alto horno granular, puede ser que, como un resultado de las reacciones puzolánicas, el refinamiento de los poros de estos cementos mezclas muestran excelente tratamiento de poro antes de la hidratación en sulfato. En cambio, el cemento Portland de control, el cemento que no reacciona con los sulfatos y los sulfatos de los sulfatos.

Tabla 2.- Relaciones entre distribución de tamaño de poro, Ca(OH)<sub>2</sub> libre y resistencia a los sulfatos de Pastas Curadas a 28 días.

Agregados	Ca(OH) <sub>2</sub> libre % (ASTM C114)	Vol. de Poro acumulado		Resistencia a los sulfatos
		>500 Å	>45 Å	
Ninguno	16.2	0.105	0.205	No satisfactorio
Puzolana natural 30%	9.4	0.075	0.200	Satisfactorio
Ceniza volante 30%	10.9	0.125	0.256	No satisfactorio
Ceniza de cáscara de arroz	0	0.025	0.195	Satisfactorio
Escoria de alto horno 30%	10.5	0.060	0.171	No satisfactorio
Escoria de alto horno 70%	3.5	0.025	0.298	Satisfactorio

FIGURA 2.- Exploración de la ceniza de cáscara de arroz en el microscopio electrónico

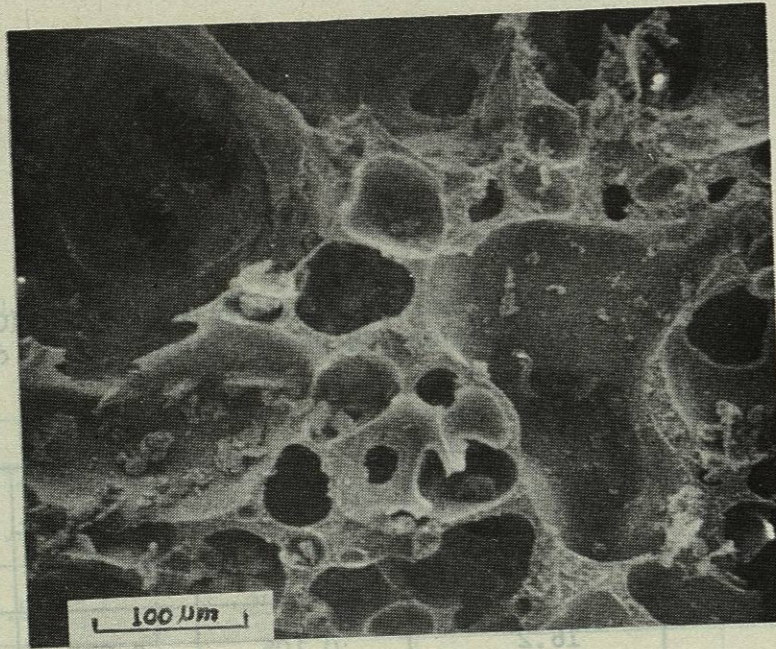


FIGURA 1. - Exploración de la puzolana natural en el microscopio electrónico

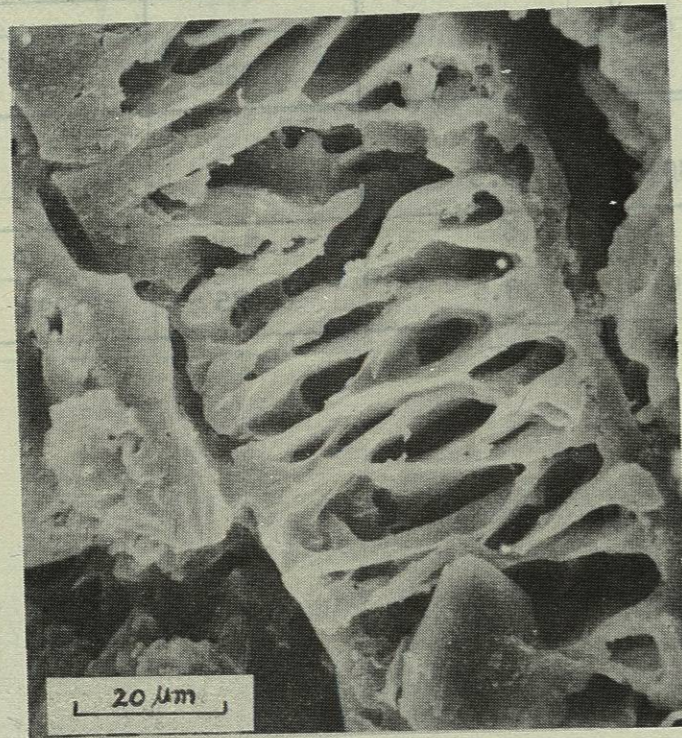


FIGURA 2.- Exploración de la ceniza de cáscara de arroz en el microscopio electrónico

Fig. 3 Distribución del tamaño de poro del cemento hidratado conteniendo 30% de puzolana natural

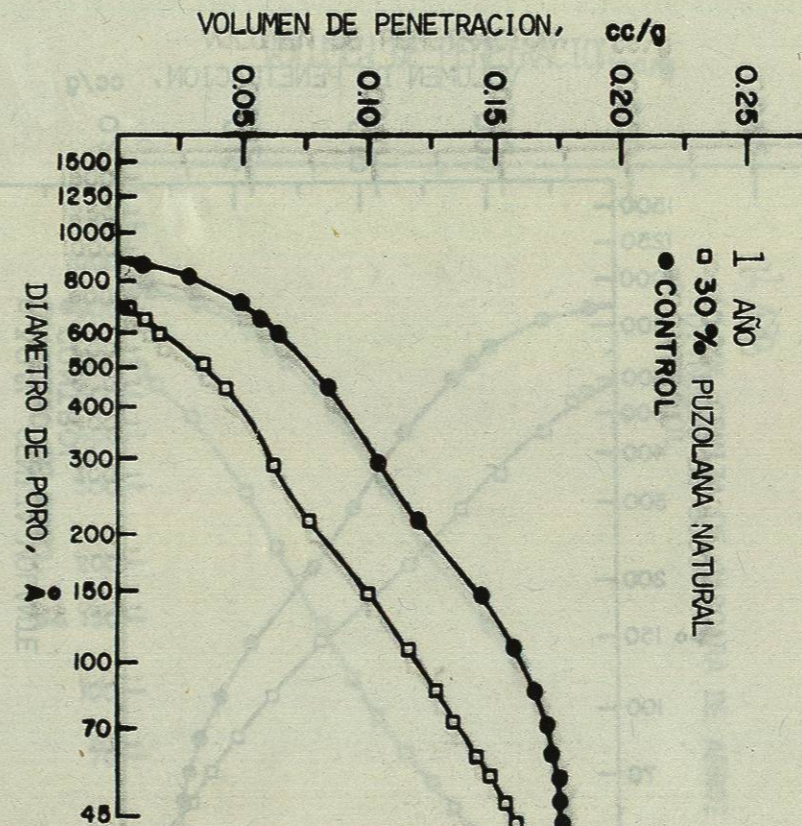
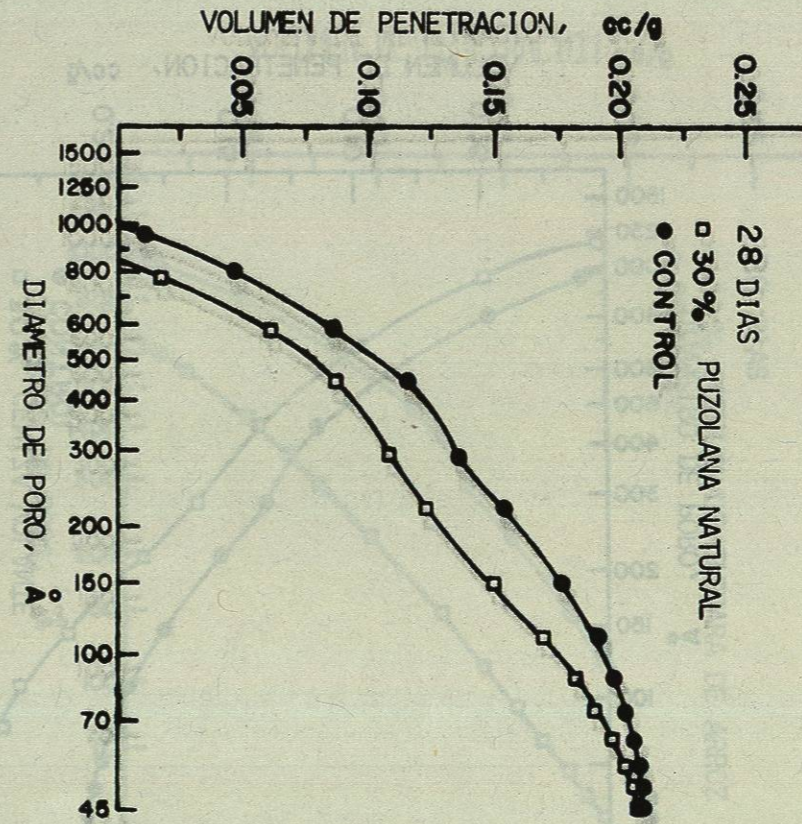


Fig. 4 Distribución del tamaño de por del cemento hidratado conteniendo un 30 % de ceniza volante

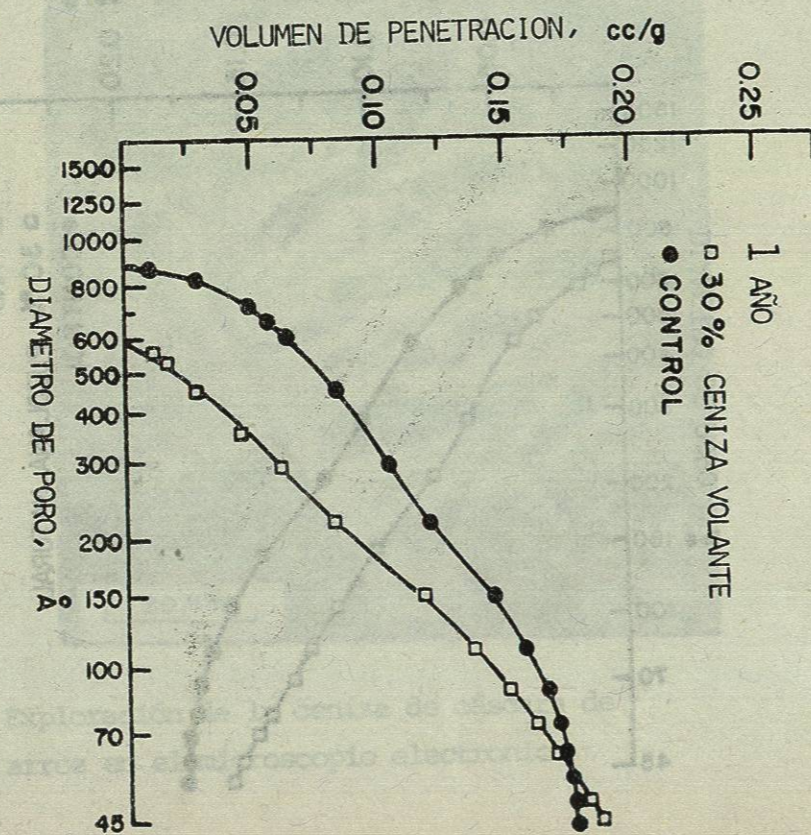
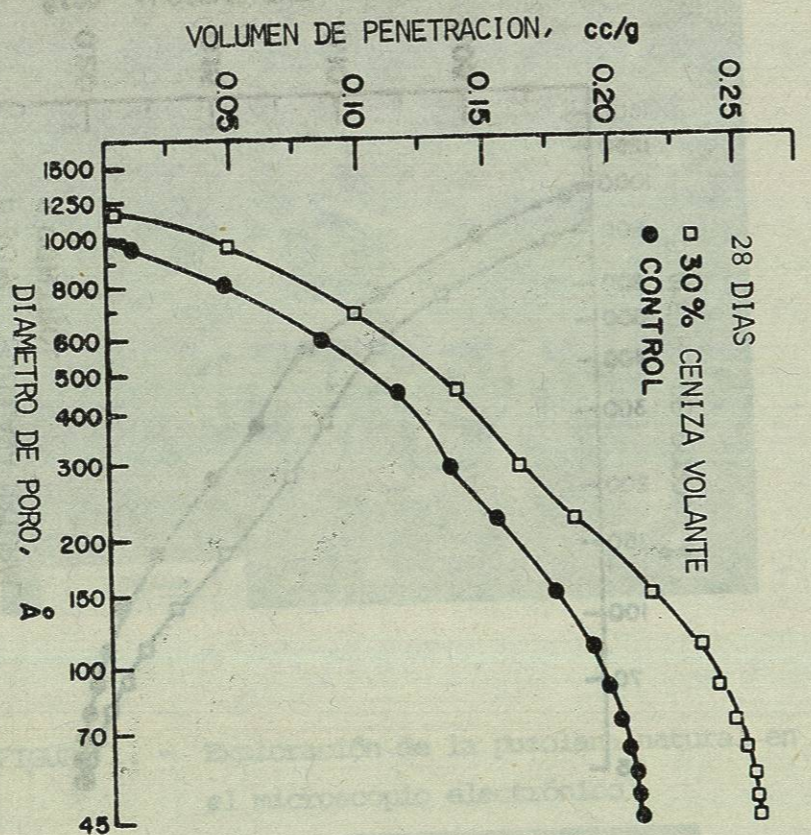


Fig. 5 Distribución de tamaño de poro del cemento hidrato conteniendo un 30 % de ceniza de cascara de arroz

