

Mercurio en un poro fino, y en cuerpo de pared delgado puede ser más alto que aquél registrado por el uso de metanol o de helio. Resultados para porosidades obtenidas para los tres fluidos metanol, helio y mercurio, son presentados en la Tabla 2. Los resultados muestran que comenzando con un período de hidratación de 28 días la porosidad total determinada por el mercurio es considerablemente mayor para las mezclas de ceniza volante (especialmente B) y la mezcla de escoria que aquella que fue determinada por metanol o helio; estos dos últimos fluidos dan resultados similares uno a otro. Para cemento Tipo I y la mezcla de cuarzo molido los resultados para los tres fluidos son mucho más consistentes.

#### AGUA NO EVAPORABLE

El incremento de agua no evaporable con tiempo de hidratación a 21 y 35°C es presentado en la Fig. 4 (A y B). En principio, estos resultados son consistentes con la porosidad y resultados de densidad. Existe una inconsistencia: la mezcla de ceniza volante B contiene considerablemente menos agua no evaporable que la mezcla de ceniza volante C a 21°C. De modo que el contenido de agua no evaporable para mezcla de escoria parece ser bajo. Es posible sin embargo, que para estas mezclas una porción de agua hidratada arrojada abajo de 100°C con relación a otras pastas de cemento. A 35°C el contenido de agua no evaporable para pastas de cemento Tipo I a 180 días es 14%, mientras que a los 21°C es 17.5%. Es sabido que a medida que la hidratación aumenta, la porosidad de la pasta disminuye debido a que los productos llenan los poros. Esto concuerda con los resultados por porosidad, el cual indica que la pasta hidratada a 35°C es más porosa que aquella hidratada a 21°C.

#### CONTENIDO DE HIDROXIDO DE CALCIO

La variación en el contenido de hidróxido de calcio con el tiempo de hidratación se presenta en la Fig. 5 (A y B). A 21°C todas las pastas excepto la mezcla de escoria muestran un incremento rápido en  $\text{Ca(OH)}_2$  con un óptimo entre 10 y 21 días. Las mezclas de ceniza volante muestran una disminución continua después de 20 días de hidratación hasta un contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  del 6 al 7% en 190 días.

El cemento Tipo I y la mezcla de cuarzo molido subsecuentemente aumentan en contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  a 16 y 11% respectivamente; el valor en la mezcla de escoria disminuye a 2.5% en 28 días. A 35°C el óptimo posible durante el período prematuro no es tan pronunciado como el de 21°C. El contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  para pasta de cemento Tipo I es 15.5% en 185 días; para mezclas para cuarzo molido éste es 11.8% en 90 días. Los valores para mezclas de ceniza volante son de 7 a 8% en 190 días y para la mezcla de escoria es 2.5% en 28 días. Los niveles de  $\text{Ca(OH)}_2$  son influenciados por la relación  $\text{CaO/SiO}_2$  de silicatos hidratados formados y la posible carbonatación en algunas de las muestras ensayadas. Esto puede explicar parcialmente el óptimo observado para hidratación a 21°C. La reacción, sin embargo, de la ceniza volante y de las mezclas de escoria con el hidróxido de calcio liberado es evidencia de los resultados y es consistente con las medi-

ciones de densidad y de porosidad.

#### PROPIEDADES MECANICAS

El aumento en el módulo de Young con tiempo de hidratación es presentado en la Fig. 6 (A y B). A los 21°C la pasta de cemento Tipo I ha aumentado rápidamente en valor en los primeros siete días relativos en la mayoría de las mezclas. De 7 a 190 días, sin embargo, las mezclas de ceniza volante aumentan en forma constante a medida que la reacción con el  $\text{Ca(OH)}_2$  se presenta. La mezcla de escoria aumenta más rápidamente que las mezclas de ceniza volante entre 3 y 28 días. El valor de E es más bajo para las mezclas que para las pastas Tipo I a ambas temperaturas aunque sus porosidades son bajas. Esto es debido en parte a su producto de densidad muy bajo. A 35°C la reacción incrementada entre ceniza volante y  $\text{Ca(OH)}_2$  es manifestada por el aumento en E para la mezcla de ceniza volante B sobre la pasta de cemento Tipo I después de 90 días. El valor de E para la mezcla de cemento Tipo I después de 190 días a 35°C es cerca de  $1.7 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>, mientras que a 21°C es  $1.85 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>. Esto de nuevo refleja la disminución en la proporción de reacción para la pasta de cemento a la temperatura más alta. Resultados casi completamente análogos fueron obtenidos de los datos de la resistencia a compresión y microdureza. Estos son presentados en las Figuras 7 y 8 (A y B) respectivamente. A 21°C y 190 días, la mezcla de ceniza volante B muestra una resistencia de 59 MPa comparadas con 64 MPa de la pasta de cemento Tipo I; a 35°C y 90 días, la mezcla de ceniza volante B y la pasta de cemento Tipo I tienen una resistencia igual a 49 MPa. Aparentemente el incremento en la temperatura de hidratación es desventajoso al desarrollo de resistencia para la pasta de cemento Tipo I; a 90 días este es 60.5 MPa a 21°C comparándolo con 50.5 MPa a 35°C. A 90 días, la resistencia a las 2 temperaturas es casi la misma para la mezcla de ceniza volante B; para la mezcla de escoria es mayor a los 28 días a la temperatura más alta. La disminución en el módulo de Young con el incremento de temperatura para el cemento Tipo I es más pronunciado que el de la resistencia a la compresión. Esto, en cambio, es más pronunciado que aquél para microdureza; una disminución de 40% relativa a hidratación a 21% ocurre para la microdureza a 190 días. Con las mezclas de escoria y ceniza volante el módulo de Young es incrementado con la temperatura mientras que las otras propiedades no son afectadas. Este fenómeno puede ser solamente explicado por el grado de hidratación, pero está probablemente asociado con una modificación en la distribución del tamaño del poro causada por las diferentes temperaturas de hidratación.

#### DURABILIDAD

La deflexión de los discos de mortero ensayados con una carga compuesta a varios tiempos de exposición a una solución de sal altamente concentrada es presentada en las Figs. 9 y 10; estos presentan resultados para morteros curados por 15 y 240 días respectivamente a 21°C. Después de 15 días de curado sólo la escoria es relativamente durable a la exposición después de 3 años. Se puede observar en la Tabla 2 que la porosidad del 70% de escoria es cerca del 36%; para el cemento Tipo I es 32% y para mezcla de ceniza volante 38%. Para poros sobre



0.09 micras la porosidad es 3.5, 7.5 y 14.5 para el cemento Tipo I, la mezcla de escoria y la mezcla de ceniza volante respectivamente. Los contenidos de  $\text{Ca(OH)}_2$  de estos 3 materiales son, 20, 3 y 10.5% respectivamente. Se puede concluir que aunque la porosidad es importante, entre más bajo sea el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  es de principal importancia en su resistencia al ataque por soluciones altas de magnesio y cloruro de calcio.

A los 240 días de curado las mezclas de ceniza volante y escoria son muy resistentes. Para la mezcla de ceniza volante, la porosidad sobre 0.09 micras probablemente menor que para la mezcla de ceniza volante (pero no ha sido medido a esta época de experimentos).

Evidentemente hay valores críticos para ambos  $\text{Ca(OH)}_2$  y porosidad con relación a la durabilidad y estos valores son interrelacionados.

**CONCLUSIONES**

Las mezclas con ceniza volante y con escoria tienen una porosidad total mayor y una distribución de poros más finos que la pasta de cemento Tipo I después de 180 días de hidratación. Datos de la resistencia a la compresión sugieren que estas mezclas se aproximan a la resistencia de la pasta del cemento en períodos mayores de 180 días.

El contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  puede ser mucho menor para las mezclas con escoria y con ceniza volante que para la pasta de cemento Tipo I a cualquier edad de hidratación.

Altas temperaturas (35°C) de hidratación son dañinas para las propiedades de largo plazo de la pasta del cemento Tipo I; la velocidad de hidratación y de resistencia se reducen y la porosidad aumenta. Para las mezclas con escoria y con ceniza volante la hidratación a 35°C es benéfica con respecto a las propiedades a largo plazo. Las adiciones de ceniza volante y escoria mejoran la durabilidad de la pasta de cemento reduciendo la porosidad y el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Los dos factores son interrelacionados, pero el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  es el más crítico.

Las arenas sílicas finas usadas en este trabajo no reaccionaron ni mejoraron la durabilidad.

**RECONOCIMIENTOS**

Al autor le gustaría reconocer el trabajo experimental de André Charron

Este trabajo es una contribución de la división del Departamento de Investigaciones, del Consejo Nacional de Canadá y es publicado con la autorización del Director de la División.

Tabla 1.- Composición química de cemento y aditivos usados

Composición química	Cemento resistente al sulfato	Ceniza volante B	Ceniza volante C	Escoria	Cemento normal
$\text{SiO}_2$	22.86	55.58	47.60	31.50	20.66
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.74	22.66	23.14	15.98	6.22
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.88	4.32	3.84	1.	2.16
CaO	63.75	13.32	14.47	36.0	64.45
MgO	1.33	2.35	4.02	12.98	1.28
Pérdida por Ignición	1.00	0.64	0.26		0.81
$\text{SO}_3$	2.00	0.16	0.29	2.8	3.02



Tabla 2.- Medición de la porosidad de las pastas de cemento por tres fluidos.

Número de días	Porosidad (Fracción de Volumen) 21°C												
	Pastas de cemento Portland normal 0.45 w/c			Ceniza volante 35% Tipo B			Ceniza volante 35% Tipo C						
	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1	0.3950	0.3775	0.4045	0.4507	0.4437	0.5128	0.4567	0.4245	0.4478	0.4470	0.5018	0.4953	0.5102
3	0.3663	0.4261	0.3753	0.4299	0.4179	0.5006	0.4190	0.4045	0.4245	0.4197	0.4222	0.4174	0.4449
7	0.3558	0.3531	0.3836	0.3997	0.3827	0.4858	0.3814	0.3670	0.4021	0.3805	0.3823	0.4174	0.4449
14	0.3557	0.5009	0.2952	0.3886	0.3745	0.3793	0.3810	0.3646	0.3732	0.3532	0.3470	0.3640	0.4253
28	0.3150	0.2972	0.2940	0.3745	0.3536	0.4009	0.3787	0.3641	0.3959	0.3507	0.3580	0.3154	0.3772
90	0.2940	0.2685	0.2510	0.3216	0.3027	0.3079	0.3188	0.2867	0.3104	0.3642	0.3532	0.3154	0.3535
150	0.2692	0.2356	0.2418	0.2578	0.2386	0.3012	0.3252	0.3097	0.3368	0.3445	0.3250	0.3154	0.3772
Porosidad (Fracción de volumen) 35°C													
2	0.3640	0.3447	0.3504	0.4210	0.4045	0.4252	0.4173	0.4044	0.4504	0.4108	0.4788	0.4645	0.4908
7	0.3476	0.3523	0.3424	0.2768	0.3502	0.3633	0.3850	0.3659	0.3935	0.4064	0.3855	0.3825	0.3923
14	0.3091	0.2891	0.3130	0.3546	0.3276	0.3554	0.3779	0.3607	0.3856	0.3922	0.3602	0.3291	0.3952
28	0.3171	0.2944	0.3078	0.3237	0.3106	0.3697	0.3561	0.3429	0.3744	0.3980	0.3796	0.2917	0.3464
90	0.2956	0.2756	0.2704	0.2534	0.2394	0.3353	0.3248	0.3104	0.3680				
150	0.3128	0.2944	0.2856										

- 1.- Porosidad por desplazamiento de CH<sub>3</sub>OH.
- 2.- Volumen de sólidos por Piconometría de helio y volumen aparente por CH<sub>3</sub>OH.
- 3.- Porosidad por porosimetría de mercurio.

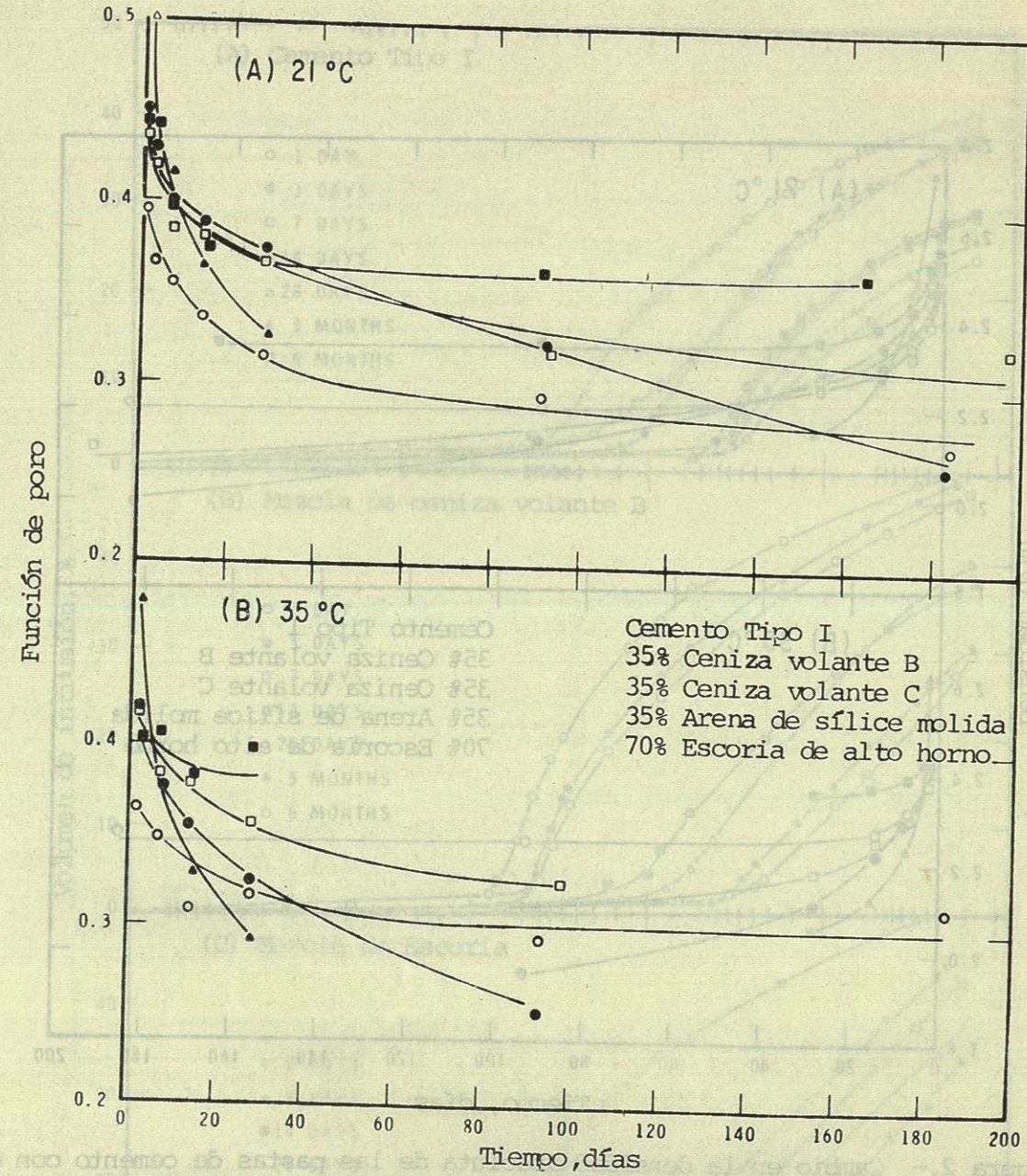


Figura 1.- Cambio en la porosidad de las pastas de cemento con el tiempo de hidratación determinado por la saturación de metanol.