

23. J. J. ... 1948, Concrete Deterioration in a Shipway, Proc. ... 1977-1005.

24. ... and S. W. Dean, Jr., editors, 1977, "Chloride Corrosion of Concrete," Am. Soc. Testing Mats., STP 629, 185 pp.

25. ... 1964. Concrete in Marine Environment, DR. ROSE FELDMAN ... 1964.

26. Walter, L. W., 1929. Thirty Years' Field Experience with Concrete, Proc. ... 1929.

B I O G R A F I A

Warren, L. R., 1954. ... the 1953 Congress of the Permanent ...

El Dr. Rose Feldman ha estado trabajando en el National Research Council de Canadá en investigación sobre los materiales de construcción por más de 22 años. Su trabajo ha sido principalmente relacionado con la Física y propiedades mecánicas de materiales porosos tal como los productos de cemento Portland, yeso, productos de cal y azufre. Últimamente ha estado relacionado en la investigación de varios aspectos de la durabilidad mediante el estudio de los cementos mezclados resistentes a la gran corrosión por el agua salada, y la investigación de cuerpos porosos. El ha sido co-autor del trabajo principal sobre propiedades mecánicas en el Séptimo Congreso Internacional de la Química del Cemento y es autor de más de 70 trabajos en revistas científicas.

R. F. Feldman\*

RESUMEN

El cemento Portland normal mezclado con dos tipos de ceniza volante y cuarzo molido para producir compuestos conteniendo un 35% de aditivo, y una mezcla conteniendo un 70% de escoria fueron curados en agua, a temperaturas de 21 a 35°C usando una relación A/C = 0.45. Después de 2, 7, 14, 28, 90 y 180 días los productos fueron examinados para grado de hidratación, porosidad, distribución de los tamaños de los poros, densidad, resistencia a la compresión, módulo de Young y microdureza. Los morteros también fueron preparados usando estas mezclas y después curados para 15 ó 240 días donde fueron expuestos a una solución salina conteniendo 27.5% de CaCl<sub>2</sub>, 3.9% MgCl<sub>2</sub>, 1.8% NaCl y 0.1% NaHCO<sub>3</sub>.

Los compuestos tuvieron una alta porosidad y una distribución de poros más fina que la pasta de cemento normal, y la resistencia se aproximó a la del cemento después de 6 meses. La reducción de porosidad y contenido de Ca(OH)<sub>2</sub> fueron factores importantes que determinaron su durabilidad.

Este fue el objetivo del estudio actual para determinar el desarrollo de la estructura de los poros en cementos compuestos por la medición de porosidad, distribución del tamaño de los poros y la densidad del cuerpo como una función del tiempo de hidratación a dos temperaturas. El desarrollo simultáneo de las propiedades mecánicas como una función del grado de hidratación y la forma de hidratación de calor fueron también medidas en cementos volantes y escoria fueron mezclados con cementos tipo I y V. Los experimentos de mortero fueron hechos en 15 y 240 días y expuestos a una solución de cloruro conteniendo 27.5% CaCl<sub>2</sub> y 3.9% MgCl<sub>2</sub>.

\* Investigador Titular de la División del Departamento de Investigación, Consejo Nacional de Investigación de Canadá, Ottawa, Canadá.



RECORD TELEFONICO

### INTRODUCCION

El hidróxido de calcio es producido y se precipita suavemente como --- cristales suficientemente grandes cuando se hidrata el cemento Portland, aun --- cuando se piensa que una cantidad pequeña está en estado amorfo. La contribución del hidróxido de calcio para la resistencia de la pasta y su adhesión con otros productos ha sido objeto de grandes debates (1-3). Se ha observado en los poros de los cuerpos con bastante agrietamiento propagar en cristales grandes de hidróxido de calcio a edades prematuras de hidratación, pero a edades posteriores las grietas se propagaron a través de los cristales. Algunos investigadores han concluido que los cristales de hidróxido de calcio o su superficie de contacto tienen una área mayor de concentración de esfuerzos y un origen de una iniciación de agrietamiento (1, 2).

Además, el hidróxido de calcio está en un estado soluble en agua o aún en agua que está ligeramente alcalina (4-7). Agua de mar y agua subterránea, --- los que asociados con minas de potasio, son muy agresivos para con el concreto --- porque éstos remueven el hidróxido de calcio del cemento Portland hidratado (8). El ion de magnesio,  $Mg^{++}$ , de estas soluciones forma soluciones relativamente insolubles de  $Mg(OH)_2$  que reaccionando con  $Ca(OH)_2$  y  $Ca^{++}$  forma una sal soluble de calcio semejante al cloruro o sulfato de calcio, el cual es rápidamente precolado. Esta acción obviamente debilita el concreto por el incremento de su porosidad, haciendo posibles exposiciones más distantes de los silicatos y soluciones agresivas. Bajo estas condiciones, los silicatos también se descomponen.

La adición de escoria y puzolanas (incluyendo ceniza volante) han demostrado mejorar el cumplimiento de los cementos expuestos a soluciones agresivas. La mayor resistencia de los cementos compuestos ha sido atribuida a la falta de grandes cantidades de  $Ca(OH)_2$  (9-12). Recientemente, se ha sugerido que la porosidad derivada de la hidratación de cementos mezclados tiene una distribución diferente, por lo cual la permeabilidad pudiera reducirse (4). Esto bajaría la --- proporción a la cual las soluciones agresivas entran al concreto.

Este fue el objetivo del estudio actual para determinar el desarrollo de la estructura de los poros en cementos compuestos por la medición de porosidad, distribución del tamaño de los poros y la densidad de producto como una función del tiempo de hidratación a dos temperaturas. El desarrollo simultáneo de las propiedades mecánicas como una función del grado de hidratación y la formación de hidróxido de calcio fueron también medidos. Dos cenizas volantes y una escoria fueron mezclados con cementos tipo I y V. Los especímenes de mortero --- fueron curados en 15 y 240 días y expuestos a una solución de cloruro conteniendo 27.5%  $CaCl_2$  y 3.9%  $MgCl_2$ .

### ENSAYES

#### Materiales

El cemento normal Tipo I fue mezclado con dos cenizas volantes diferen

tes y cuarzo molido (arena sílica Ottawa) para dar tres mezclas conteniendo 35% de la adición. Una cuarta mezcla se hizo con el cemento Tipo I y un 70% de escoria. El cuarzo fue preparado con aquel que se retuvo en la malla #100. Sesenta por ciento de la arena molida tuvo un diámetro entre 150 y 45  $\mu$  en las cenizas --- volantes 85% de las partículas fueron entre 45 y 12  $\mu$  (13).

La escoria de alto horno también se mezcló con cemento resistente al --- sulfato impidiendo al cemento (Tipo V) para dar una mezcla conteniendo 37.50 y --- 70% de escoria, de los cuales los morteros fueron hechos. La composición de los materiales se muestra en la Tabla I. Se puede observar que las cenizas volantes y la escoria contienen cantidades muy altas de sílice pero cantidades menores de CaO que los cementos Portland.

### HIDRATACION

Se hicieron cubos de 50 x 50 mm con cinco materiales o mezclas diferen--- tes, usando un cemento normal Tipo I, una arena de cuarzo, dos cenizas volantes y una escoria. La relación de agua/sólido fue 0.45. Los cubos fueron perforados después del curado de 24 horas y rebanados en discos de 32 mm de diámetro y 1.3 mm de grueso. Se hicieron mediciones después de los períodos de hidratación de aproximadamente 2, 7, 14, 28, 90 y 180 días. La hidratación fue llevada a cabo a 21 y 35°C.

Los morteros fueron usados para el estudio del efecto de las solucio--- nes salinas. Estos fueron preparados con una relación agua/sólido de 0.5 y arena/cemento (para cemento mezclado) con una relación de 2.25. Discos de 7 mm de diámetro y 6.4 mm de grueso fueron curados para 15 y 240 días antes de ser ex--- puestos a una solución de salina conteniendo 27.5% de cloruro de calcio, 3.9% --- cloruro de magnesio, 1.8% cloruro de sodio y 0.1% de bicarbonato de sodio (8).

### METODOS

#### Porosidad y Densidad.

Tres técnicas se usaron para medir la porosidad:

(1).- Saturación de la muestra deshidratada con metanol puro. Las --- muestras húmedas fueron secadas y pesadas en aire y otra vez en metanol. Estas mediciones fueron usadas para calcular el volumen total de poros, porcentaje de --- porosidad por volumen y el volumen aparente del cuerpo (14).

(2).- Piconometría de la comparación de helio.- La aplicación de es--- ta técnica para el sistema de cemento Portland hidratados ha sido descrita en --- otra parte (14). Los volúmenes de sólidos de especímenes secos y húmedos son me--- didos, permitiendo la determinación de porosidad (el volumen aparente fue tomado de las mediciones del metanol) y densidad de sólidos.

(3).- Porosimetría de mercurio.- La distribución del tamaño de poros fueron obtenidos a distintos tiempos por la introducción de mercurio en especímenes húmedos y secos, utilizando una presión hasta 408 MPa.

El equipo de la American Company Specimens fue usado para este propósito. El volumen del mercurio introducido a la máxima presión fue considerado como la porosidad total (15).

Resistencia a la compresión; módulo de Young y microdureza:

La resistencia en compresión fue medida sobre cubos de 51 mm, dos cubos para cada preparación. El módulo de Young fue medido sobre discos de 32 mm de diámetro y 1.3 mm de grueso, tomando en cuenta por lo menos 4 discos para cada valor. El procedimiento involucra la medición de la deflexión de un espécimen saturado y cargado en su centro y apoyado en tres puntos sobre la circunferencia de un círculo de 25 mm de diámetro. La máquina de ensayos Leitz para microdureza con un dentador Vicker fue usado para la medición de la microdureza de los discos usados para los módulos de elasticidad. También se llevaron a cabo mediciones en condiciones saturadas; cada valor fue el promedio de las lecturas tomadas sobre cuatro discos (13).

GRADO DE HIDRATACION Y CONTENIDO DE HIDROXIDO DE CALCIO:

T.G.A. y Termogramas D.S.C. fueron obtenidos para cada espécimen entre las temperaturas ambientales 1000 y 600°C, respectivamente. El agua no evaporable fue estimada en distintos tiempos tomando la pérdida de peso del T.G.A. entre 100 y 1000°C. La celda de un calorímetro de exploración diferencial, abastecido con un módulo para el sistema de análisis termal DU PONT 990, fue usado para obtener los termogramas. Estos fueron usados para determinar las áreas relativas de los picos resultantes de la descomposición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . En cada experimento 20 mg de muestra fueron calentados en aire a una velocidad de 20°C/min. para propósitos de la calibración de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de pureza conocida, se mezcló con  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en diferentes proporciones, y en áreas endotérmicas fueron delineados contra concentraciones  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (16).

RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Las Figuras 1 a la 8 ilustran la influencia del tiempo de hidratación de las distintas mezclas sobre porosidad, densidad, distribución de tamaños de poros, agua no evaporable, concentración de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , módulo de Young, Resistencia a la compresión y microdureza.

POROSIDAD

La variación de la porosidad a temperaturas de 21 y 35°C es presentada en la Fig. 1 (A y B). En ambas temperaturas la porosidad medida por saturación

de metanol es inicialmente más baja para cementos Tipo I. Esto es mejorado no obstante a 21°C por la mezcla de ceniza volante B como a los 160 días y la mezcla de escoria probablemente a los 50 días. A 21°C la disminución en la porosidad del cemento Tipo I es más rápida que a los 35°C; la porosidad a los 180 días a 21°C es cerca del 27% comparada con el 31% a 35°C. Por otro lado, a 35°C la ceniza volante B tiene una porosidad del 26% a los 90 días, la ceniza volante C, 32% a los 90 días y la escoria 29% a los 28 días; este puede ser comparado con 32% para ambas cenizas volantes y 33% para escoria a 21% para períodos de hidratación similares.

DENSIDAD ABSOLUTA.

El cambio en densidad absoluta debido al proceso de hidratación es presentado en la Fig. 2 (A y B). Tendencias similares a aquéllos observados por porosidad son evidentes. A 21°C la densidad para pastas hechas con cemento Tipo I es 2.2 gr/ml a 180 días; la densidad de la mezcla de ceniza volante disminuye más que la de cemento Tipo I después de 40 días y es tan baja como 2.0 g/ml a 180 días. La densidad de la mezcla con escoria disminuye aún más rápidamente, siendo 2.15 a los 28 días. A 35°C estos efectos son más intensificados: La densidad del cemento Tipo I es 2.25 a los 180 días de hidratación, mientras las mezclas de ceniza volante son tan bajas como 1.95 g/ml a los 90 días y la mezcla de escoria y sílice, 2.05 g/ml a los 28 días. La densidad para la mezcla sílice es 2.35 g/ml después de 28 días a ambas temperaturas.

DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE POROS

Las distribuciones de tamaños de poros para cemento Tipo I, mezcla de ceniza volante B y escoria hidratada a 21°C para diferentes períodos de hidratación son presentados en la Figura 3 (A, B y C). Para cemento Tipo I la mayoría de los poros están en el rango de 0.9 a 0.003 micras (9000 a 30 unidades de Angstrom) de diámetro después de un día de hidratación. Después de 14 días el principal rango de poros es 0.09 a 0.003 micras. La porosidad más grande que 0.09 micras después de 6 meses de hidratación es 2% y más grande que 0.15 micras 15%. En mezclas de ceniza volante, cuerpos con poros pequeños no fueron observados hasta después de 28 días de hidratación. A los 28 días, la porosidad más grande que 0.9 micras es 8.5% comparada con menos que el 3% para cemento Tipo I. Para tamaño de poro más pequeño que 0.015 micras la mezcla de ceniza volante cede una porosidad mayor que para la de cemento Tipo I. Esto es considerando, sin embargo, que estos tamaños pequeños de poro no son un factor significativo al establecer la permeabilidad de un cuerpo (4). Los resultados para la mezcla de escoria presentada en la Figura 3 (c) muestran una tendencia similar a las porosidades muy altas a los 14 días; a 28 días la porosidad total sobre 0.09 micras es solamente cerca del 3%, aun cuando las porosidades totales sobre 0.015 y 0.003 micras son 23 y 37.5% respectivamente. La temperatura más alta produce una disminución más rápida en porosidad para la mezcla de escoria. Trabajo previo ha indicado que la intrusión de mediciones de mercurio puede causar daño a la estructura de un poro (15). Por lo tanto, la porosidad efectiva registrada por