



Tabla 1. Efectos del Concreto de Laboratorio con y sin ella

Sustitución	Agua kg/m ³	Resistencia a la compresión MPa	
		3 días	28 días
Concreto estándar	125	11.0	18.5
Pumicita	125	5.2	12.8
Pizarra Calci- nada	125	5.9	13.7
Ceniza volante	125	4.1	16.9

El efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia, el contenido de CH y el grado de hidratación del C₃S del cemento de ceniza volante y el cemento solo. Se observó la microestructura de la pasta del cemento de ceniza volante por medio de un microscopio electrónico de exploración (MEE) y se encontró que sumando una cantidad propia de yeso al cemento de ceniza volante se aceleraba la reacción entre el CH y el cemento de ceniza volante e incrementaba el grado de hidratación del C₃S durante el curado a vapor. El cambio en la microestructura con la adición de yeso también fue observado.

Estructura	Material	Cemento y Puzolana kg/m ³	Agua kg/m ³	Resistencia a la compresión MPa		
				7 días	28 días	90 días
John Day Dam	Pizarra calcinada	125	88.5	3.5	10.3	20.0
		224	91.5	10.7	25.6	
Harbell Dam	Ceniza volante	140	108.5	2.6	6.8	12.8
		210	105.5	7.5	15.4	25.4

HIDRATACION DEL CEMENTO CENIZA VOLANTE A TEMPERATURAS ELEVADAS

PROF. HUANG SHIYUAN*

RESUMEN

Se estudió el efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia, el contenido de CH y el grado de hidratación del C₃S del cemento de ceniza volante y el cemento solo. Se observó la microestructura de la pasta del cemento de ceniza volante por medio de un microscopio electrónico de exploración (MEE) y se encontró que sumando una cantidad propia de yeso al cemento de ceniza volante se aceleraba la reacción entre el CH y el cemento de ceniza volante e incrementaba el grado de hidratación del C₃S durante el curado a vapor. El cambio en la microestructura con la adición de yeso también fue observado.

* Investigador visitante en el Swedish Cement and Concrete Institute, Profesor Asociado en el Instituto Wuhan de Materiales para la Construcción, --- Wuhan, China

INTRODUCCION

Como es bien sabido, la resistencia a temprana edad del cemento de ceniza volante es demasiado baja, pero su última resistencia es aún mas alta que la del cemento portland normal. La baja resistencia inicial limita mas ó menos el uso del cemento de ceniza volante en las construcciones estructurales. El curado a vapor, puede acelerar la hidratación del cemento de ceniza volante e incrementar la resistencia de la pasta de cemento de ceniza volante con un curado subsecuente a temperatura ambiente mientras que una sobre elevación de temperatura de curado, causa pérdidas de resistencia del cemento portland normal. De ahí que el cemento de ceniza volante sea apropiado para la producción de elementos de concreto curados a vapor.

Pocos trabajos han sido publicados sobre la hidratación y microestructura de la pasta cemento de ceniza volante especialmente a temperaturas elevadas. Recientemente K. Takemoto y H. Uchikawa (1) en el 7o. Simposio Internacional de la Química del Cemento, repasaron los trabajos de hidratación de cementos puzolánicos incluyendo la pasta de cemento de ceniza volante pero solamente a temperaturas ambientes.

En el presente estudio han sido comparados y observados con aquellas del cemento portland solo, las propiedades de resistencia, la composición de la fase y la microestructura de la pasta a altas temperaturas; así como las influencias al adicionar yeso al cemento de ceniza volante y son sometidas a discusión.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Para ésta investigación se usó el más común de los cementos portland Suecos (Slite Standard) y tres tipos de cenizas volantes. La calidad del cemento de ceniza volante era la mejor calificada teniendo más alto contenido de vidrio que carbón. Las pastas fueron coladas en moldes de plástico de 19 mm ϕ x 70 mm de altura, fueron sacados de los moldes 24 horas después y curadas a vapor a temperaturas definidas. Los cilindros de pasta endurecida se cortaron en pequeños cilindros o rebanadas para diferentes ensayos. El tamaño de los especímenes para los ensayos de resistencia a la compresión y la tensión son de ϕ 19 mm x 20 mm y ϕ 19 x 3 mm respectivamente. Se hicieron análisis cuantitativos por difracción de rayos "X" de acuerdo con el método desarrollado y descrito en detalle por Grudemo (2), utilizando un espécimen de polvo de silicio con una intensidad estándar y radiación $\text{CuK}\alpha$. Se tomaron muestras de tajadas de la pasta endurecida de los cilindros, para analizarlas por medio de rayos "X" con el fin de reducir la cantidad de errores estadísticos. Los especímenes se estuvieron girando sobre su propio plano con una velocidad de una revolución por segundo. La intensidad se determinó, midiendo el área de los picos característicos de C_3S ($51.8^\circ 2\theta$) y de CH (18.1° , 47.1° y $50.8^\circ 2\theta$) sobre lo observado.

Las muestras para las observaciones en el microscopio electrónico de barrido se cortaron en rebanadas de los cilindros de pasta almacenadas en al-

cohol al 99% para suspender la hidratación antes de la observación en el M.E.E. la muestra se rompió, se secó al vacío y se cubrió con recubrimiento de metal pesado en su superficie fracturada. Las superficies fracturadas fueron observadas con el M.E.E. (JSM-U3, acelerando el voltaje a 20 KV).

EFECTOS DE LAS TEMPERATURAS DE CURADO EN LA HIDRATACION DEL CEMENTO DE CENIZA VOLANTE

El efecto de la temperatura de curado en la resistencia de la pasta del cemento de ceniza volante, inmediatamente después del curado a vapor y subsecuentemente curado a temperatura ambiente durante 28 días, se ilustra en las figuras 1 y 3.

Para cemento solamente, una temperatura de curado mayor disminuyó su resistencia. La resistencia de la pasta de cemento solamente curada subsecuentemente a temperatura ambiente 28 días, después de un curado a vapor a 95° durante 15 horas, la resistencia es menor que la del curado a la temperatura ambiente, a la misma edad, por ejemplo, la pérdida de resistencia ocurre debido al curado a vapor a altas temperaturas. Parece ser que la temperatura óptima del curado para cemento Slite (normal Sueco) es alrededor de 50° y no mayor de 75°C .

Para el cemento con ceniza volante tanto la resistencia inmediatamente después del curado a vapor, como la resistencia a 28 días después del curado a temperatura del laboratorio, se incrementa con la temperatura de curado.

La resistencia de la pasta de cemento que contiene 20% de ceniza volante, después del curado a vapor a 95°C , excede la resistencia de la pasta de cemento puro bajo las mismas condiciones de curado. Además, la resistencia de las que contienen de 40 a 60% de ceniza volante, se aproximan a la resistencia de la pasta de cemento puro. Se ha encontrado que no hay pérdidas sino mas bien incrementos de resistencia debido al curado a vapor del cemento de ceniza volante.

La hidratación para ambos cementos (normal y ceniza volante) fueron estudiados tentativamente por DRX. Los hidratos de silicato de calcio formado por la hidratación del cemento normal y por la reacción entre la ceniza volante e hidróxido de calcio es amorfo o pobremente cristalizado y sus indistintas cimas (50° , 31.2° , 29.6° , 20°) coinciden en su mayoría con las de C_3S y C_2S ; por lo tanto el contenido de hidratos de silicato de calcio difícilmente podrían ser determinados por la DRX. De ahí que la cantidad de nuevos hidratos formados por la reacción de ceniza volante con CH fueron estimados indirectamente por el contenido de CH, determinado por la DRX. Se midieron el contenido de anhídrido C_3S en cemento normal y pasta de ceniza volante y a partir de éstos podría ser calculado fácilmente el grado de hidratación C_3S .

Las Figuras 4 y 5 nos muestran el cambio de grado en la hidratación del C_3S y el contenido de cristales CH en cemento portland normal y pasta de

cemento de ceniza volante respectivamente. El contenido de anhídrido residual C_3S se incrementó considerablemente en un rango de temperatura de 50° a $95^\circ C$ y el contenido en el cemento portland se incrementa ligeramente con la temperatura de curado para la pasta de cemento puro. Lo que revela que el gel CSH en los curados a alta temperatura (más de $75^\circ C$) es menor y tiene una relación de porcentaje C/S más pequeña que los curados a baja temperatura.

La pérdida de resistencia en el cemento portland debido al curado por alta temperatura, ha sido interpretado para diferentes casos tales como: agrietamientos, deformación, distribución en el número de poros, etc. Observando los datos de hidratación se puede interpretar como una inhibición de la hidratación de C_3S , por un gran recubrimiento de productos hidratados formados por las altas temperaturas. Contrario a la pasta de cemento puro, el contenido de CH en las pastas de cemento con ceniza volante, decrece con una elevación de la temperatura de curado lo cual indica, que elevando la temperatura de hidratación del cemento con ceniza volante y CH, nos resulta una reacción acelerante muy grande. El grado de hidratación C_3S en la pasta de cemento con ceniza volante no disminuye debido al incremento en la temperatura de curado. Esto se debe a que el movimiento de portlandita promueve la hidratación del silicato de calcio.

Una temperatura elevada también acelera la interacción entre la alúmina activa de la ceniza volante, yeso en cemento y el CH. Los productos de hidratación varían con la temperatura: La Etringita se forma por abajo de los $75^\circ C$ y el monosulfato entre los 75° y $95^\circ C$, el cual se descompone en hidrograna te arriba de los $95^\circ C$ (Fig. 6).

EFFECTO DE LA ADICION DEL YESO EN LA HIDRATACION DEL CEMENTO DE CENIZA VOLANTE

Se mencionó antes que una adición de yeso podría acelerar la reacción entre la cal y la ceniza volante de la pasta de cal-ceniza volante curado a vapor e incrementar la resistencia en forma importante (3). Efectos similares se han encontrado con la adición de yeso al cemento con ceniza volante curado a vapor. Los efectos de resistencia del yeso en el cemento con ceniza volante; así como el contenido de CH y grado de hidratación del C_3S se muestran en la Tabla I. La Figura 6, nos ilustra para su comparación los diagramas DRX de las pastas de ceniza volante con y sin la adición de yeso hidratado a $95^\circ C$.

El yeso adicionado acelera la reacción del CH con la sílica y alúmina activas en la ceniza volante, lo cual puede probarse por la marcada disminución de contenido de CH y el incremento de Etringita y de monosulfato, el cual tiende a descomponerse en hidrograna te a altas temperaturas. En la pasta curada a vapor con adición de yeso, el anhídrido residual C_3S es menor que en la que no se le añade el yeso, lo cual significa que el C_3S en la pasta con yeso se hidrata en mayor proporción. La gran cantidad de gel CSH y de hidratación de C_3S puede ser considerada como la causa principal de el efecto de la adición de yeso en la resistencia a la compresión. Efectos similares fueron observados en el caso del desarrollo de resistencia a la tensión por compresión diametral.

LA MICROESTRUCTURA DE LA PASTA DEL CEMENTO CON CENIZA VOLANTE HIDRATADA A TEMPERATURAS ELEVADAS

Las propiedades de la pasta de cemento no dependen solamente de los tipos y cantidades de los productos de hidratación sino también de su porosidad y microestructura. Han sido publicados una gran cantidad de estudios en pastas de cementos Portland utilizando el MEE, entre los cuales merece especial atención el realizado por Diamond (4). En esta investigación, Diamond clasificó:

- Tipo I - Fibroso
- Tipo II - Red Reticular
- Tipo III - Granos Uniformes
- Tipo IV - Producto Interno

y esta clasificación se usa en este estudio.

La microestructura de la pasta de cemento con ceniza volante hidratada a $95^\circ C$ se comparó con la misma mezcla hidratada a temperatura ambiente. La estructura de hidratos en una pasta hidratada a temperatura ambiente durante 28 días, consiste principalmente en partículas de gel CSH Tipo I, CH de fase laminar, filamentos cilíndricos de etringita y cristales monosulfáticos con una considerable cantidad de poros entre ellos. Con el tiempo de curado, la cantidad de gel CSH, formado por la reacción de la ceniza volante con el cemento, aumenta, la estructura del gel CSH llega a ser mas densa y la fase Tipo III del gel CSH se convierte en fase Tipo I, llegando a ser la fase predominante. Gran cantidad de esferas lisas de ceniza volante, con superficie tersa sin reaccionar, puede observarse en la superficie fracturada de las pastas hidratadas a temperatura normal aun hasta la edad de 28 y 100 días (Fig. 7), lo que significa que la adhesión entre los hidratos y granos de ceniza volante es muy débil y los huecos alrededor de los granos de ceniza volante son los eslabones más débiles en la pasta, los cuales se rompen cuando se aplica una carga de tensión. K. Ogawa y otros (5) suponen que los espacios entre los hidratos y las puzolanas tienen una relación cercana con la de los alkalis disueltos de la puzolana.

La estructura de la pasta de cemento con ceniza volante hidratada a $95^\circ C$ durante 15 horas esta compuesta principalmente de gel denso de CSH del Tipo III y depósitos de CH dentro de ella. Unas pocas esferas tersas de ceniza volante pueden verse en la superficie de fractura (Fig. 8). Lo que indica que una elevación en la temperatura de curado acelera la reacción puzolánica como ha sido mencionada anteriormente, hace que la estructura de gel CSH se densifique y aumente su resistencia a la adhesión entre los granos de ceniza volante y los hidratos.

En las pastas con adición de yeso, el gel CSH Tipo III es aun la fase predominante, pero una morfología de red reticular ocurre actualmente (gel CSH Tipo II) y difícilmente pueden encontrarse granos de superficie lisa de ceniza volante en la superficie fracturada.