

EXUDACION DEL HORMIGON: Efecto de la incorporación de cenizas volantes

GIACCIO, G.*

RESUMEN

En la actualidad la incorporación de adiciones minerales al hormigón reviste particular interés tanto en el ámbito nacional como internacional por las ventajas técnico - económicas que presentan. Entre las adiciones merecen contarse subproductos de la industria tales como la escoria granulada de alto horno o las cenizas volantes. Si bien la exudación es un fenómeno que puede producir importantes pérdidas de calidad en elementos estructurales de hormigón, no es frecuente encontrar estudios sobre este tema. En este trabajo se analizan los efectos producidos por la incorporación de cenizas volantes sobre los parámetros de exudación de hormigones elaborados con cementos de diferentes características y una ceniza volante de bajo contenido de calcio. Se incluyen como variables la relación agua - ligante, la finura de las cenizas y el volumen incorporado.

INTRODUCCION

El hormigón es un material compuesto por elementos de diferentes densidades. A causa de ello, durante el periodo de inactividad que precede al fraguado, las partículas sólidas sedimentan dando lugar a la acumulación de agua en la superficie. Este fenómeno llamado exudación conduce a la obtención de un hormigón en la zona superior de los elementos estructurales de mayor relación agua - cemento y, en consecuencia, mayor porosidad y menor resistencia. Esta pérdida generalizada de calidad será función principalmente de la magnitud de la exudación producida, como así también de las características de las mezclas y de la geometría de las piezas. (1.2).

La exudación esta caracterizada por tres parámetros: la *capacidad* de exudación, es decir la cantidad de agua exudada (la cual podrá ser expresada en diferentes maneras, siendo lo más común hacerlo en % del volumen de agua total); la *velocidad* de exudación, esto es la velocidad a la que se acumula el agua y la *duración* del proceso. Los posibles daños que se generaran en una estructura de hormigón dependerán de la magnitud de estos parámetros. De esta forma a la pérdida generalizada de calidad ya mencionada pueden sumarse defectos localizados como bolsas de aire semejantes a

* Investigador CIC. LEMIT, UNLP. Profesor Fac. Ing. (UNLP)

fisuras debajo de los agregados gruesos y/o canales. En términos generales la presencia de bolsas está vinculada con una elevada capacidad de exudación (cantidad de agua exudada) mientras que la canalización se da fundamentalmente en mezclas poco cohesivas con altas velocidades de exudación. (1,2).

En presencia de volúmenes importantes de hormigón y elementos estructurales de altura significativa se hace particularmente necesario el control de la exudación, a modo de ejemplo efectos de ella se han registrado pérdidas de resistencia en los niveles superiores del orden del 30 % en hormigones de aparente buena calidad. Asimismo, por la naturaleza de los defectos (bolsas y canales presentan diferente orientación) se ha verificado que el hormigón puede presentar además un comportamiento marcadamente anisotrópico. (2).

A pesar de la importancia que reviste el tema, no son muchos los trabajos realizados en los que se estudia en profundidad el fenómeno de exudación y su posible implicancia sobre la calidad del hormigón.

En la actualidad la incorporación de adiciones minerales al hormigón reviste particular interés tanto a nivel nacional como internacional por las ventajas técnico - económicas que presentan. No sólo la mayor parte de los cementos incluye adiciones minerales sino que ya ha sido asimilado el concepto de que los aditivos y las adiciones son materiales componentes del hormigón junto con el agua, el cemento y los áridos. Este artículo se enmarca dentro de una línea de trabajo que involucra el análisis de los efectos producidos por la presencia de diferentes tipos de adiciones minerales (puzolanas naturales y productos derivados de la industria) en hormigones convencionales y especiales, entre los que se destacan los hormigones de alta performance y los que incorporan un alto volumen de adición.

En experiencias anteriores se había encontrado que en hormigones de baja relación agua – ligante (del orden de 0.30-0.35) con alto volumen de adición, ya sean cenizas volantes o puzolanas naturales no fue posible observar la acumulación de agua exudada en la superficie del hormigón. (3,4). En el caso de emplear puzolanas en diferente volumen y en mezclas de mayor relación agua – ligante (0.50) se encontró que al incrementar el reemplazo de cemento por puzolana se reducían los parámetros de exudación (5). Sin embargo este comportamiento no puede ser independiente de las características de las partículas. Mientras las puzolanas poseen formas angulosas las cenizas son esféricas. A su vez pueden existir diferencias en la capacidad de fijar agua, porosidad, densidad etc. de las distintas adiciones.

En este artículo se presentan los resultados más importantes de una serie de evaluaciones realizadas sobre más de 20 hormigones. Su principal objetivo es evaluar la incidencia de la incorporación de cenizas volantes, ya sea como reemplazo de cemento o como adición, sobre la capacidad y velocidad de exudación de hormigones elaborados con distintos tipos y contenidos de cemento, con relaciones agua - cemento variables. Se abarca un amplio rango de mezclas con contenidos unitarios de cemento que van desde 170 hasta 410 kg/m³ con el propósito de poner de manifiesto los distintos mecanismos generados por la presencia de las cenizas volantes. Asimismo, los cementos elegidos presentan diferente reactividad.

EXPERIENCIAS

Materiales y series

Para la elaboración de los hormigones se emplearon como ligantes tres cementos portland de diferentes características y reactividad (que se identifican como: "A", "B" y "C") y una ceniza volante (CV) de bajo contenido de calcio. Esta última fue empleada en su estado natural (CVN) y también luego de ser procesada en un seleccionador neumático de partículas, incrementándose de esta forma su finura (CVS: ceniza volante seleccionada).

La composición química y las características físicas de los cementos y las cenizas volantes se presentan en la Tabla 1.

Los cementos seleccionados presentan diferentes finuras que van desde 3380 a 4610 cm^2/g , siendo en el primer caso el contenido de partículas mayores a 75 μm superior al 10 %.

El cemento "A" posee la menor finura un elevado contenido de C_3S y el mayor tiempo de fraguado inicial. El cemento "B" presenta una finura bastante más elevada y baja el contenido de C_3S incrementando el de C_2S . Finalmente el cemento "C" es el de mayor superficie específica, con un alto contenido de C_3S y C_3A .

La ceniza volante en su forma natural posee un 41 % de partículas mayores de 45 μm y 26.4 % mayor de 75 μm , con una superficie específica de 2860 cm^2/g . En el caso de la ceniza seleccionada, CVS, se incrementa la finura disminuyendo el contenido de partículas mayores a 45 y 75 μm al 7 y 5 % respectivamente, con una superficie específica de 4200 cm^2/g .

Como agregados se utilizaron arena silíceo natural, con un módulo de finura igual a 2.79 y piedra partida granítica de tamaño máximo igual a 25 mm. En la Tabla 1 se incluyen sus respectivas granulometrías.

Con el conjunto de materiales descrito se elaboraron tres series de hormigones correspondientes a los tres cementos elegidos. En la Tabla 2 se indican las dosificaciones empleadas.

La serie 1 fue elaborada con el cemento "A" y comprende los hormigones 1 a 12. En ella se estudia la influencia de la incorporación de cenizas volantes en hormigones de diferente razón agua - cemento. Se elaboraron 4 mezclas patrón de relación a/c 0.40, 0.55, 0.69 y 0.86. Para considerar el efecto de las cenizas volantes en los hormigones 2, 6 y 10, se reemplazó 20 % en peso del cemento por CVN y en los hormigones 3 y 7 por CVS respectivamente. En el caso de las mezclas 4, 8 y 11 se incrementa el reemplazo de cemento por CVN al 30 %. En forma similar, el efecto de la adición de 25 % de CVN o CVS se pone de manifiesto al comparar los hormigones 6 y 7 con el 9 para la relación a/c 0.69, y, el hormigón 10 con el 12 para la razón a/c 0.86.

Tabla 1. Características de los materiales empleados.

| Propiedades | | Cemento | | | Ceniza volante | | | | | | |
|--|---------------|---------|-------|-------|----------------|-------|-----|------|------|------|-------|
| | | A | B | C | CVN | CVS | | | | | |
| Ensayos físicos | | | | | | | | | | | |
| Pasa 75 μm (%) | | 10.8 | 2.4 | 2.4 | 26.4 | 5.0 | | | | | |
| Pasa 45 μm (%) | | - | - | - | 41.0 | 7.0 | | | | | |
| Blaine (cm^2/g) | | 3380 | 4080 | 4610 | 2860 | 4200 | | | | | |
| Peso específico: | | - | - | - | 1.92 | 2.20 | | | | | |
| Tiempo de fraguado | inicial (min) | 175 | 165 | 150 | - | - | | | | | |
| | final (min) | 250 | 265 | 200 | - | - | | | | | |
| Expansión en autoclave (%) | | 0.01 | -0.03 | -0.02 | - | - | | | | | |
| Resistencia a flexión (MPa) | 1 día | - | - | 4.0 | - | - | | | | | |
| | 2 días | - | - | 5.4 | - | - | | | | | |
| | 3 días | - | - | 6.3 | - | - | | | | | |
| | 7 días | 5.8 | 7.3 | 7.7 | - | - | | | | | |
| | 28 días | 8.3 | 8.4 | 7.8 | - | - | | | | | |
| | 90 días | - | 8.8 | - | - | - | | | | | |
| Resistencia a compresión (MPa) | 1 día | - | - | 16.9 | - | - | | | | | |
| | 2 días | - | - | 28.1 | - | - | | | | | |
| | 3 días | - | - | 33.8 | - | - | | | | | |
| | 7 días | 24.7 | 34.4 | 46.2 | - | - | | | | | |
| | 28 días | 42.2 | 48.0 | 49.7 | - | - | | | | | |
| | 90 días | - | 55.0 | - | - | - | | | | | |
| Análisis químico (%) | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | | 21.20 | 21.60 | 21.40 | 59.60 | 58.80 | | | | | |
| CaO | | 63.20 | 61.40 | 64.10 | 4.90 | 3.50 | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | | 3.40 | 3.30 | 3.40 | 24.00 | 24.60 | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | | 3.40 | 6.90 | 4.50 | 6.90 | 6.70 | | | | | |
| Na ₂ O | | 0.21 | 0.02 | 0.18 | 0.84 | 1.87 | | | | | |
| K ₂ O | | 0.92 | 0.90 | 0.75 | 0.31 | 0.41 | | | | | |
| SO ₃ | | 2.50 | 2.30 | 2.50 | 0.59 | 0.53 | | | | | |
| MgO | | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 2.06 | 2.06 | | | | | |
| Pérdida por calcinación | | 3.30 | 1.90 | 1.40 | 0.72 | 1.80 | | | | | |
| Residuo insoluble | | 0.80 | 0.60 | 0.80 | - | - | | | | | |
| Composición potencial (%) | | | | | | | | | | | |
| C ₃ S | | 61.3 | 44.0 | 61.9 | - | - | | | | | |
| C ₂ S | | 14.9 | 28.0 | 1.4 | - | - | | | | | |
| C ₃ A | | 3.3 | - | 13.7 | - | - | | | | | |
| C ₄ FA | | 10.3 | - | - | - | - | | | | | |
| C ₄ FA + C ₂ F | | - | 18.7 | - | - | - | | | | | |
| Granulometría de los agregados. (% que pasa) | | | | | | | | | | | |
| Tamiz | 1½" | 1" | ¾" | ½" | 3/8" | Nº4 | Nº8 | Nº16 | Nº30 | Nº50 | Nº100 |
| A. Fino | | | | | | 100 | 95 | 77 | 38 | 10 | 1 |
| A. grueso | 100 | 97 | 71 | 20 | 7 | 0 | | | | | |

Tabla 2. Dosificaciones.

| Hormigón | a/c+CV | Ceniza volante | | Materiales (kg/m ³) | | | | |
|--|--------|----------------|------|---------------------------------|---------|-------|-------|-------|
| | | (%) | tipo | Agua | Cemento | C. V. | A. F. | A. G. |
| Serie 1 | | | | | | | | |
| 1 | 0.40 | 0 | - | 165 | 410 | - | 770 | 1055 |
| 2 | | 20 | CVN | 165 | 325 | 80 | 765 | 1045 |
| 3 | | 20 | CVS | 165 | 325 | 80 | 765 | 1045 |
| 4 | | 30 | CVN | 161 | 280 | 120 | 745 | 1020 |
| 5 | 0.55 | 0 | - | 165 | 300 | 0 | 840 | 1060 |
| 6 | | 20 | CVN | 165 | 240 | 60 | 840 | 1060 |
| 7 | | 20 | CVS | 165 | 240 | 60 | 840 | 1060 |
| 8 | | 30 | CVN | 162 | 210 | 90 | 830 | 1050 |
| 9 | 0.69 | 0 | - | 165 | 240 | - | 905 | 1050 |
| 10 | | 20 | CVN | 164 | 190 | 50 | 900 | 1045 |
| 11 | | 30 | CVN | 165 | 170 | 70 | 860 | 995 |
| 12 | 0.86 | 0 | - | 165 | 190 | - | 920 | 1070 |
| Serie 2 | | | | | | | | |
| 13 | 0.40 | 0 | - | 166 | 415 | - | 780 | 1065 |
| 14 | | 20 | CVN | 163 | 325 | 80 | 765 | 1045 |
| 15 | | 20 | CVS | 163 | 325 | 80 | 765 | 1045 |
| 16 | 0.55 | 0 | - | 165 | 300 | - | 855 | 1075 |
| 17 | | 20 | CVN | 163 | 240 | 60 | 840 | 1060 |
| 18 | | 20 | CVS | 163 | 240 | 60 | 840 | 1060 |
| 19 | | 30 | CVN | 163 | 210 | 90 | 840 | 1060 |
| Serie 3 | | | | | | | | |
| 20 | 0.55 | 0 | - | 165 | 300 | - | 850 | 1075 |
| 21 | | 30 | CVN | 165 | 210 | 90 | 840 | 1060 |
| a/c+CV: relación agua / ligante. A.F. : Agregado fino. A.G. : Agregado grueso. | | | | | | | | |

La serie 2 abarca los hormigones 13 a 19; en este caso se utilizó el cemento "B". Esta serie incluye 2 hormigones patrones de relaciones a/c 0.40 y 0.55. En forma semejante a lo realizado en la serie 1, se reemplazó 20 % en peso del cemento por CVN y CVS dando lugar a los hormigones 14 y 17, 15 y 18 respectivamente. En el hormigón 19 se reemplazó el 30 % de cemento por CVN.

La serie 3, formada por los hormigones 20 y 21, fue elaborada con el cemento "C". En ella se analiza el efecto del reemplazo de 30 % de cemento por CVN en un hormigón de relación agua ligante 0.55.

RESULTADOS

En la Tabla 3 se informan los resultados del ensayo de exudación a partir de los cuales se obtuvieron las curvas de exudación que se representan en las Figs. 1 a 6. Los ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM C-232, sobre volúmenes de hormigón de aproximadamente 12 litros, midiendo el volumen de agua exudada a intervalos de 10 minutos durante los primeros 40 minutos y posteriormente cada 30 minutos. A partir de los valores obtenidos se trazaron las curvas y se calcularon los parámetros de exudación.

En la Tabla 4 se informan la capacidad y la velocidad de exudación y se incluye además el asentamiento de los hormigones estudiados.

Tabla 3. Exudación del hormigón. Volumen de agua exudada (ml).

| Hormigón | Tiempo (min) | | | | | | | | | |
|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 70 | 100 | 130 | 160 | 190 | 220 |
| Serie 1 | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.7 | 5.4 | 11.1 | 17.0 | 35.0 | 54.0 | 64.0 | 64.7 | 64.7 | - |
| 2 | 0.7 | 4.4 | 8.9 | 14.4 | 29.4 | 44.4 | 58.4 | 62.0 | 62.0 | - |
| 3 | 1.0 | 5.3 | 11.1 | 18.3 | 37.8 | 54.3 | 68.8 | 80.8 | 86.8 | 88.3 |
| 4 | 1.6 | 7.1 | 13.6 | 19.7 | 41.2 | 60.2 | 79.2 | 94.2 | 101.2 | 103.6 |
| 5 | 28.0 | 78.0 | 125.0 | 157.0 | 177.0 | 178.3 | 179.0 | 179.0 | - | - |
| 6 | 32.0 | 90.0 | 130.0 | 161.0 | 167.6 | 168.4 | 168.4 | - | - | - |
| 7 | 104.0 | 200.0 | 228.0 | 238.0 | 240.0 | 241.0 | 241.0 | - | - | - |
| 8 | 23.0 | 100.0 | 142.0 | 164.0 | 174.0 | 175.0 | 175.0 | - | - | - |
| 9 | 105.0 | 115.0 | 117.0 | 119.2 | 125.8 | 126.8 | 126.8 | - | - | - |
| 10 | 68.0 | 88.0 | 101.0 | 123.0 | 141.0 | 142.0 | 142.0 | - | - | - |
| 11 | 114.0 | 134.0 | 147.0 | 153.0 | 154.0 | 154.0 | - | - | - | - |
| 12 | 67.0 | 74.5 | 79.0 | 81.5 | 82.5 | 82.5 | - | - | - | - |
| Serie 2 | | | | | | | | | | |
| 13 | 1.0 | 5.8 | 10.6 | 15.9 | 28.9 | 29.9 | 29.9 | - | - | - |
| 14 | 0.5 | 5.7 | 10.9 | 16.9 | 29.9 | 37.9 | 38.9 | 38.9 | - | - |
| 15 | 1.2 | 5.0 | 9.7 | 14.9 | 31.9 | 45.9 | 49.4 | 49.9 | 49.9 | - |
| 16 | 24.0 | 54.0 | 76.0 | 94.0 | 105.0 | 105.5 | 105.5 | - | - | - |
| 17 | 31.0 | 67.0 | 90.0 | 104.0 | 107.6 | 107.6 | - | - | - | - |
| 18 | 56.0 | 117.0 | 150.0 | 159.0 | 160.0 | 160.0 | - | - | - | - |
| 19 | 48.0 | 118.0 | 150.0 | 163.0 | 169.0 | 169.0 | - | - | - | - |
| Serie 3 | | | | | | | | | | |
| 20 | 0.0 | 1.3 | 3.1 | 5.3 | 17.3 | 28.3 | 36.6 | 42.3 | 42.3 | - |
| 21 | 0.7 | 5.0 | 10.7 | 16.2 | 33.2 | 51.2 | 65.2 | 74.3 | 75.0 | 75.0 |

En las Figs. 1 a 3 se presentan las curvas correspondientes a los hormigones de la serie 1, de razón agua – ligante 0.40, 0.55 y 0.69 respectivamente. En cada caso es posible analizar el efecto de reemplazar 20 y 30 % de cemento por CVN y por 20 % de CVS en las 1 y 2. Siguiendo el mismo criterio anterior en las Figs. 4 y 5 se grafican las curvas de la serie 2 (razón agua – ligante 0.40 y 0.55) y finalmente en la Fig. 6 los resultados de la serie 3. En términos generales, a partir de las figuras junto con los valores de la Tabla 4, se observan niveles de exudación acordes con experiencias anteriores. La duración de los ensayos estuvo comprendida entre 100 y 220 minutos, con capacidades de exudación que oscilaron entre 1.6 al 11.6 %, es decir desde niveles que no producirán daños hasta otros que implican riesgo. (2). De igual forma la velocidad varía desde 11×10^{-6} cm/s hasta valores muy superiores a los 100×10^{-6} cm/s, nivel a partir del cual diversos autores plantean que puede esperarse que exista canalización. En el caso de los hormigones sin cenizas se observa que al disminuir la relación agua – cemento, se extiende el periodo de velocidad constante, las curvas son más graduales y aumenta la duración del proceso.

Tabla 4. Propiedades del hormigón fresco.

| Hormigón | a/c+CV | Ceniza volante | | Asentamiento (cm) | Exudación | |
|----------------|--------|----------------|------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | (%) | tipo | | Capacidad | Velocidad |
| | | | | (%) | (10^{-6} cm/s) | |
| Serie 1 | | | | | | |
| 1 | 0.40 | 0 | - | 5.0 | 3.1 | 19 |
| 2 | | 20 | CVN | 3.0 | 3.0 | 16 |
| 3 | | 20 | CVS | 13.0 | 4.2 | 20 |
| 4 | | 30 | CVN | 4.0 | 5.1 | 22 |
| 5 | 0.55 | 0 | - | 5.0 | 8.8 | 155 |
| 6 | | 20 | CVN | 4.5 | 8.2 | 160 |
| 7 | | 20 | CVS | 18.0 | 11.6 | 330 |
| 8 | | 30 | CVN | 4.0 | 8.6 | 195 |
| 9 | 0.69 | 0 | - | 4.5 | 6.1 | > 345 |
| 10 | | 20 | CVN | 3.5 | 7.0 | > 225 |
| 11 | | 30 | CVN | 6.5 | 7.5 | > 375 |
| 12 | 0.86 | 0 | - | 2.0 | 4.1 | >> 220 |
| Serie 2 | | | | | | |
| 13 | 0.40 | 0 | - | 7.0 | 1.6 | 16 |
| 14 | | 20 | CVN | 7.0 | 2.0 | 18 |
| 15 | | 20 | CVS | 9.0 | 2.5 | 17 |
| 16 | 0.55 | 0 | - | 9.0 | 5.2 | 99 |
| 17 | | 20 | CVN | 9.5 | 5.2 | 118 |
| 18 | | 20 | CVS | 15.0 | 8.1 | 200 |
| 19 | | 30 | CVN | - | 8.4 | 230 |
| Serie 3 | | | | | | |
| 20 | 0.55 | 0 | - | 3.5 | 2.1 | 11 |
| 21 | | 30 | CVN | 5.5 | 3.8 | 22 |

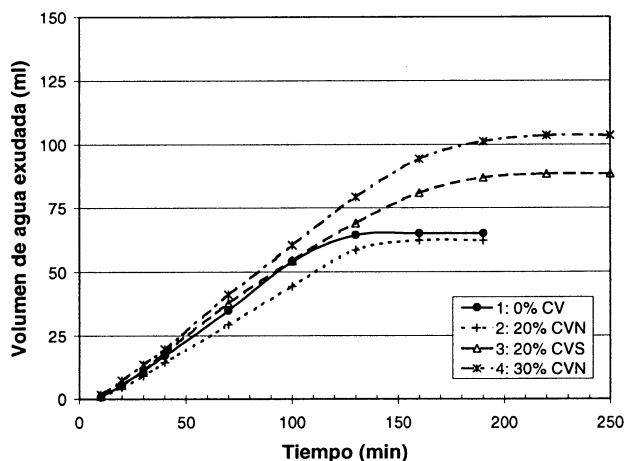


Figura 1. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. a/c+CV=0.40. Serie 1.

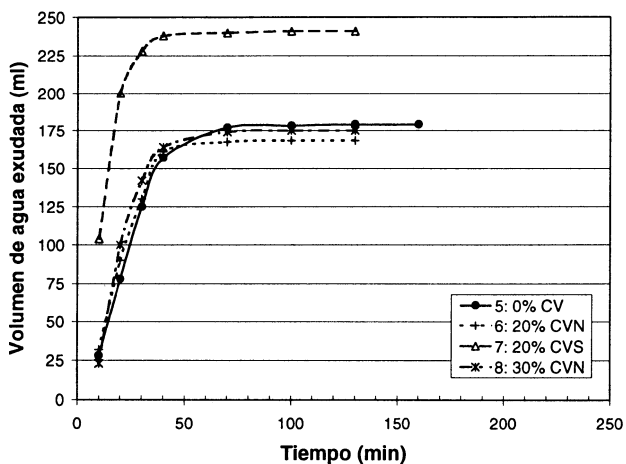


Figura 2. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. a/c+CV=0.55. Serie 1.

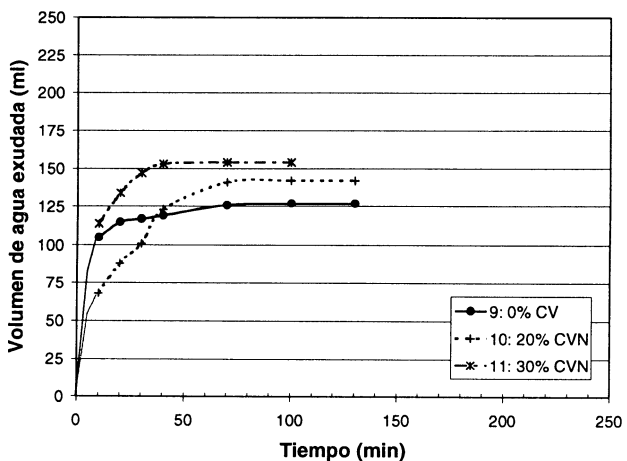


Figura 3. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. a/c+CV=0.69. Serie 1.

Figura 4. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. $a/c+CV=0.40$. Serie 2

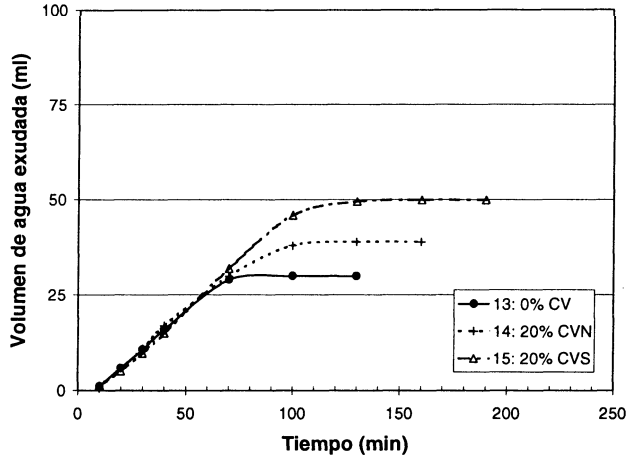


Figura 5. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. $a/c+CV=0.55$. Serie 2

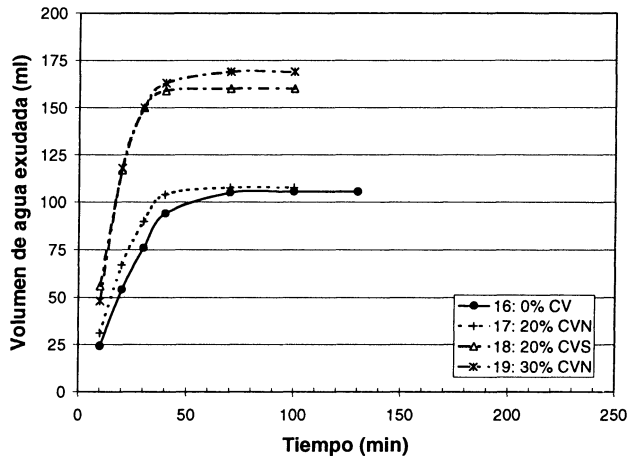
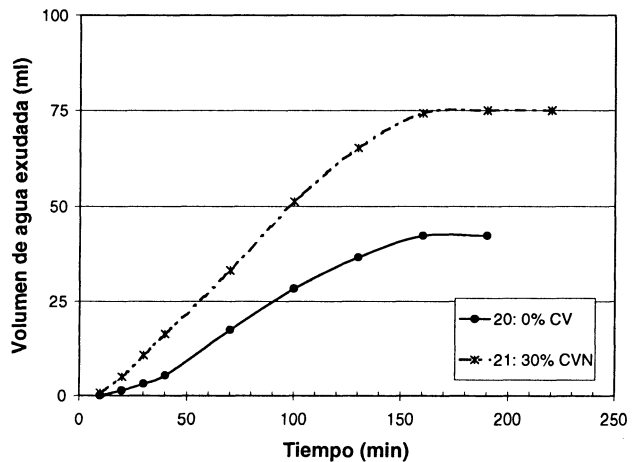


Figura 6. Efecto del reemplazo de cemento por ceniza volante sobre la exudación. $a/c+CV=0.40$. Serie 3



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Previo al análisis de los resultados es importante marcar que dado que el método de ensayo no posibilita la lectura continua del volumen de agua exudada, sino a intervalos de tiempo, en el caso de hormigones de muy elevada velocidad de exudación no puede precisarse el valor de la misma. No obstante ello, puede afirmarse que la velocidad es superior al valor que resultaría de considerar la primera lectura (valor informado en la Tabla 4) y de acuerdo a la forma de la curva puede inferirse un orden de magnitud.

Serie 1

Los valores informados en la Tabla 4 y las Figs. 1 a 3 ponen de manifiesto la influencia de la relación agua cemento sobre los parámetros de exudación (hormigones 1, 5, 9, 12). Se observa que al incrementar la relación agua - cemento, también se incrementa la velocidad de exudación. Este fenómeno se verifica para todas las mezclas a excepción de la 12 (agua - cemento igual a 0.86) donde sólo puede afirmarse que es mayor a 220×10^{-6} cm/s, infiriéndose por la forma de la curva que es muy superior a dicho valor.

En el caso de la capacidad de exudación se produce una variación aparentemente contradictoria que halla su explicación en algunos aspectos teóricos del desarrollo del proceso de exudación. Puede observarse que al incrementar la razón a/c de 0.40 a 0.55 aumenta la capacidad, pero al pasar de 0.55 a 0.69 o de 0.69 a 0.86 se produce una disminución cada vez más acentuada de la misma. Esto estaría indicando que la masa sólida se asentó hasta formar una estructura granular por puenteo de partículas, lo que condujo a la finalización de la exudación.

Cabe recordar que en el hormigón en estado plástico, los agregados están dispersos en la pasta y las partículas de cemento en el agua. Esta distribución en el espacio es función, principalmente, de las fuerzas de atracción y repulsión existentes entre las partículas de menor tamaño. Inicialmente esta suspensión no es estable debido a que las partículas sólidas tienden a descender. Al producirse este asentamiento se reduce la distancia entre partículas, hasta que llegan a estar virtualmente en contacto (los espacios interparticulares son rellenados posteriormente por productos de hidratación del cemento) y se detiene el asentamiento de toda la masa. (1, 6). Esto es válido en la medida que el tiempo de fraguado de la mezcla permita el desarrollo de todo el proceso.

Principalmente en las mezclas más pobres, durante el descenso de partículas, suele producirse el puenteo de los agregados mayores. Estos no pueden seguir el descenso de la pasta produciéndose una mayor concentración de agua debajo de ellos, que se traduce en una menor acumulación de agua en la superficie, es decir, una menor capacidad de exudación. En la medida que las mezclas son más ricas se hace cada vez más difícil que se produzca el puenteo de los agregados.

De lo expuesto surge que la exudación puede finalizar ya sea por el avance de la hidratación del cemento (creación de una estructura semirrígida entre partículas sólidas que detiene su descenso), porque llega al estado de contacto virtual entre partículas, o, por la creación de una estructura granular por el puenteo de los agregados.

En lo referido al reemplazo de cemento por ceniza volante, es posible observar que al igual que en el caso de adición sólo se producen variaciones significativas de asentamiento al emplear CVS.

Al reemplazar 20% de cemento por CVN no se produjeron variaciones importantes de los parámetros de exudación. Al incrementar el reemplazo a 30 % tiende a aumentar la exudación (Tabla 4 y Figs 1 a 3). Este aumento puede ser atribuido a que el reemplazo de cemento por CVN se traduce en la incorporación de un material más grueso.

En lo concerniente a CVS, la sustitución de un 20 % de ligante incrementó la exudación, lo que halla su justificación en la significativa ganancia de movilidad experimentada por estos hormigones, donde el asentamiento pasó de 5 a 13 y a 18 cm respectivamente para los hormigones 3 y 7. Este efecto fue más notorio para la relación agua - ligante 0.55 en concordancia con el mayor incremento de asentamiento.

Con el propósito de facilitar el análisis de la incorporación de cenizas volantes como adición al contenido de cemento en la Tabla 5 se vuelcan las características de los hormigones 9, 6, 7, 12 y 10 como así también los valores de capacidad y velocidad de exudación. La comparación de las mezclas 9, 6 y 7 permite analizar el efecto de adicionar un 25 % en peso de cemento de CVN y CVS a un hormigón de razón agua – cemento 0.69, manteniendo constante el contenido de agua. En forma similar, los hormigones 12 y 10 ponen de manifiesto lo que ocurre cuando se adiciona 25 % de CVN, en iguales condiciones, a un hormigón de relación agua – cemento 0.86. En las Figs. 7 y 8 se representan las curvas de exudación correspondientes a cada razón agua – cemento.

Tabla 5. Efecto de la adición de ceniza volante sobre la exudación del hormigón.

| Hormigón | a/c | Agua (kg/m ³) | Cemento (kg/m ³) | Ceniza volante | | Asent. (cm) | Exudación | |
|----------|------|------------------------------|---------------------------------|----------------------|------|----------------|------------------|--------------------------------------|
| | | | | (kg/m ³) | tipo | | Capacidad (%) | Velocidad (10 ⁻⁶ cm/s) |
| 9 | 0.69 | 165 | 240 | 0 | - | 4.5 | 6.1 | > 345 |
| 6 | | 165 | 240 | 60 | CVN | 4.5 | 8.2 | 160 |
| 7 | | 165 | 240 | 60 | CVS | 18.0 | 11.6 | 330 |
| 12 | 0.86 | 165 | 190 | 0 | - | 2.0 | 4.1 | >> 220 |
| 10 | | 164 | 190 | 50 | CVN | 3.5 | 7.0 | > 225 |

a/c: relación agua / cemento.

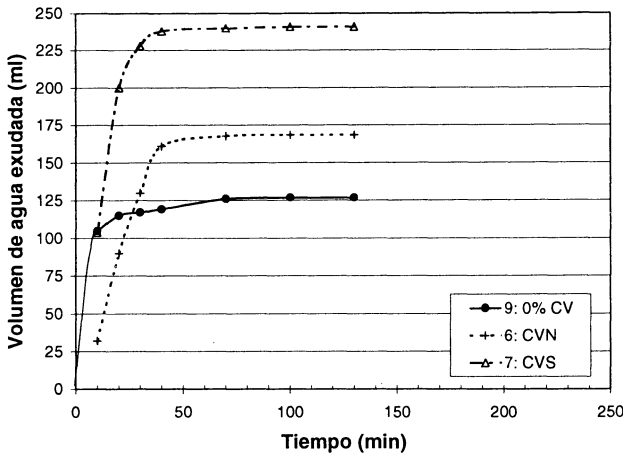


Figura 7. Efecto de la adición de ceniza volante sobre la exudación. a/c=0.69. Serie 1.

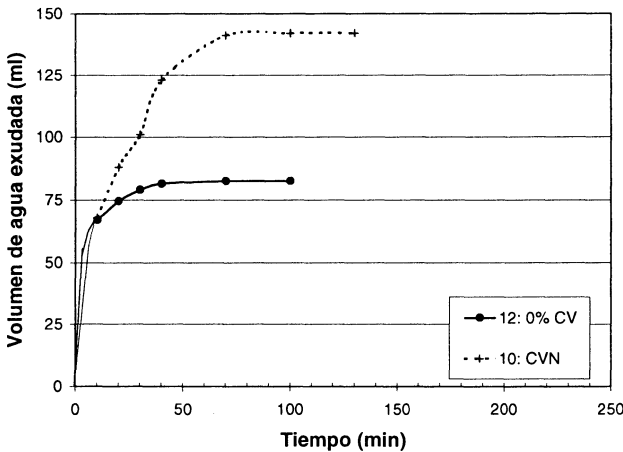


Figura 8. Efecto de la adición de ceniza volante sobre la exudación. a/c=0.86. Serie 1.

La adición de ceniza volante no produjo variaciones significativas en el asentamiento del hormigón, excepto el caso en el que se empleó CVS. Tanto en los hormigones de razón agua - cemento 0.69 como 0.86 se observa que al adicionar 25 % de ceniza volante decrece la velocidad de exudación y crece la capacidad como se aprecia en la Tabla 5 y las Figs. 7 y 8. Si bien no puede precisarse la velocidad de exudación, de la Fig. 8 surge que el hormigón 12 presenta mayor velocidad que el hormigón 10.

Este hecho puede atribuirse a que al adicionar ceniza volante se reduce la relación agua - ligante lo que conduce a una reducción de la velocidad de exudación. Por otra parte, esto también conduciría a reducir la capacidad de exudación, pero al incrementarse el volumen de pasta permite un mejor acomodamiento de las partículas, evitando así el puenteo de los agregados e incrementando la cantidad de agua exudada.

Asimismo, comparada con la ceniza de menor finura (CVN), la adición de CVS (hormigón 7) condujo a un mayor incremento de la capacidad de exudación y a un menor decrecimiento de la velocidad atribuible al incremento de movilidad conferido al hormigón.

Serie 2

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4 y las Figs. 4 y 5 se pone de manifiesto que para la razón agua ligante 0.40 no existen variaciones significativas de velocidad al reemplazar cemento por CVN o CVS. Se produce un pequeño incremento de asentamiento cuando se sustituye CVS que se corresponde con un ligero crecimiento de la capacidad de exudación.

En los hormigones de razón agua ligante 0.55 se produce un mayor aumento del asentamiento al emplear CVS. Al reemplazar 20 % de cemento por CVN no se producen mayores variaciones de los parámetros de exudación, siendo ligeramente superior la velocidad. Al reemplazar el 30 % se produce un marcado incremento de la exudación. Este efecto se presenta en forma más acentuada en esta serie que en la serie 1, pues, dado que el cemento "B" presenta mayor finura que el cemento "A" crece la incidencia del reemplazo de cemento por un material más grueso y con poca capacidad de retener agua, como es CVN. Nuevamente se observa que en las mezclas ricas se produce un incremento de la exudación en correspondencia con el aumento de la relación agua - cemento.

Serie 3

En esta serie se verifica un crecimiento de los parámetros de exudación cuando se incorpora ceniza volante como reemplazo del contenido de cemento. Si bien los valores alcanzados no son elevados y no hacen prever la aparición de daños (en hormigones con agregados de reducido tamaño máximo) los incrementos relativos son importantes.

El análisis conjunto de las 3 series elaboradas pone de manifiesto la influencia de las características del cemento sobre la capacidad y la velocidad de exudación. Como era de esperar los valores de exudación se ordenan de acuerdo a la finura y reactividad creciente de los cementos, siendo los mayores para el cemento "A", seguido por el "B" y finalmente el "C". Asimismo, es importante destacar que la incorporación de ceniza volante, aún de mayor finura que el cemento, puede producir incrementos de la capacidad y la velocidad de exudación capaces de ocasionar la formación de bolsas de aire debajo de los agregados gruesos e incluso canalización, lo que puede traducirse en una pérdida de calidad del hormigón, mucho mayor que la que se produciría en el hormigón sin cenizas.

CONSIDERACIONES FINALES

Las características propias de los diversos tipos de adiciones, en particular lo que se relaciona con su forma, distribución granulométrica y capacidad de retener agua, junto con los diferentes comportamientos que presentan los hormigones en estado fresco derivados de sus dosificaciones (y materiales componentes) hacen que cuando se incorporan adiciones minerales no sea posible generalizar sus efectos sobre la exudación. A partir de estas experiencias, y sobre la base de otras anteriores, se verificó que los parámetros de exudación decrecen al incrementar la finura y reactividad del cemento. Cuando se incorporaron cenizas volantes se observó que al incrementarse significativamente la movilidad del hormigón, por presencia de partículas con reducida capacidad de retener el agua, también se incrementó la exudación. El reemplazo de cemento por ceniza volante, incluso de mayor finura, no condujo a disminuir la exudación. En el caso de adicionar las cenizas volantes a mezclas pobres se produjo un incremento de la capacidad de exudación, por el incremento del volumen de pasta.

Por todo lo expuesto y en consideración a los pocos, y a veces contradictorios, resultados presentados en la bibliografía se considera necesaria la realización de estudios específicos previos a la utilización de cenizas volantes, o cualquier otro tipo de adición mineral, a los efectos de valorar las modificaciones en los parámetros de exudación.

REFERENCIAS

- (1) Powers, T.C. "The properties of fresh concrete", J. Willey & Sons Inc. New York - Toronto - Sidney, 1968, pp. 533-650.
- (2) Giaccio, G. and Giovambattista, A. "Bleeding: Evaluation of its Effects on Concrete Behaviour", *Materiaux et Construction*, vol.19, n°12, RILEM Aug. 1986, pp. 265-271.
- (3) Giaccio, G.M. and Malhotra, V.M. "Concretes Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash", *ASTM Journal, "Cement, Concrete and Aggregates"*, vol.10, n°2, winter 1988, pp 88-95.
- (4) Giaccio, G., Giovambattista, A. y Zerbino, R. "Propiedades de los hormigones elaborados con alto volumen de puzolanas naturales", *Rev. Hormigón* n°20 AATH, La Plata, 1991, pp. 5-14.
- (5) Giaccio, G. y Zerbino, R. "Empleo de altos volúmenes de puzolanas naturales en la elaboración de hormigones estructurales" *Rev. Hormigón* n°27 AATH, La Plata, 1994, pp. 29-36.
- (6) Ravina Dan and Metha, P. K. "Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash", *Cement and Concrete Research*, vol.16, n°2, 1986, pp. 239-253.