



DR. PHIL WALTER LUKAS

Academy of Sciences of the USSR, Moscow, U.S.S.R.

- 2.- United Nations Statistical Yearbook, 1979.
- 3.- Schwabach, P. "European cement production and the opportunity for cement." Heidelberg Cement Co., German Cement Association, 1977.
- 4.- [Faded text]
- 5.- [Faded text]
- 6.- [Faded text]
- 7.- Meyer, A. "Investigations on the properties of concrete containing fly ash." Symposium on the Chemistry of Cement, VIII, pp. 394-401. Tokyo 1968.
- 8.- [Faded text]
- 9.- Mills, R.H. "Age-brittlement of glass-reinforced concrete containing Blastfurnace slag". In press.
- 10.- [Faded text]
- 11.- Mills, R.H. "Creep and shrinkage of concrete containing mixtures of portland cement and high-magnesia blastfurnace slag". Trans. S. Afr. Instn. Civ. Eng. 11 (Jan. 1969) pp. 1-11.
- 12.- Meyer, A. "Experiences in the use of Silica-fume in Germany".
- 13.- [Faded text]
- 14.- [Faded text]
- 15.- [Faded text]
- 16.- Mollard, P. "Canadian experience with the use of blended cements". Symp. Energy and Resources conservation in the Cement and Concrete Industry. Paper 3.5, CANMET, Ottawa 1976.
- 17.- [Faded text]

CENIZA VOLANTE COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO.

Walter Lukas

Tienen que ser considerados varios aspectos en la utilización de las cenizas volantes...

RESUMEN

La ceniza volante se utiliza en la construcción con varios propósitos. Uno de estos usos es como cementante hidráulico.

En este caso tiene que reunir ciertas propiedades. La ceniza con buenas propiedades puzolánicas puede ser utilizada en la producción de concreto masivo hasta un 35% en masa...

Con períodos de reacción mayores de 90 días, éstos son iguales a los del cemento Portland normal, excediéndolo en el caso de ceniza volante con buenas propiedades puzolánicas.

La foto 7 muestra la formación de la resistencia...

La foto 7 muestra la formación de la resistencia...



Tienen que ser considerados varios aspectos en la utilización de las revolturas de cemento con ceniza volante en la producción de concreto. La cantidad de ceniza volante que puede ser utilizada como sustituto del cemento depende de su calidad. Utilizando una ceniza volante con buenas propiedades puzolánicas, hasta un 20% del cemento puede sustituirse con ceniza volante en concreto reforzado. En estructuras de concreto masivo es posible sustituir hasta un 35%. Esto conduce a importantes materias primas y a ahorros considerables de energía en la producción de concreto y como resultado, algunos problemas ambientales están siendo resueltos.

Además, el uso adecuado de la ceniza volante ha provocado avances tecnológicos en el procesamiento del concreto. Aquí podría mencionarse su mejor manejabilidad, facilidad de bombeado, mejor resistencia a los sulfatos y más bajo calor de hidratación. Aparte de estas ventajas, un sinnúmero de diferentes propiedades tecnológicas tienen que ser tomadas en cuenta en los concretos de cemento con ceniza volante. Estas incluyen diferencia en el desarrollo de la resistencia y tendencias a mejorar la resistencia a la carbonatación. Además el grado y la naturaleza del aire incluido puede ser alterado.

La ceniza volante es el resultado de la calcinación del carbón vegetal y mineral en plantas generadoras de calor. Estos carbones contienen originalmente, roca finamente distribuida a su alrededor. Entre las temperaturas de 1000°C a 1300°C, se efectúa dentro del horno un cambio en la fase de las partículas finas de roca constituyentes del carbón.

En estas condiciones, las impurezas componentes del carbón originalmente cristalinas son transformadas en productos más o menos vitrosos (esencialmente cuarzo, mica y feldespato). En las buenas cenizas, solamente una pequeña parte permanece como un componente cristalino. La parte vitrosa contiene ambos granos globulares y en forma de pepitas. Los globulares pueden ser sólidos o huecos. Los microanálisis han mostrado que las partículas individuales cambian en su composición química. Además, muchas de estas esferas vídrias muestran un conjunto estructural, por ejemplo (v. gr.) un cambio en la composición química puede encontrarse en las partículas respectivas.

Como las cenizas tienden a endurecerse cuando reaccionan con hidróxido de cal y agua, deben de incluirse en el grupo de las puzolanas sintéticas. Varios análisis químicos de diferentes cenizas han mostrado que las buenas propiedades puzolánicas se deben principalmente a los altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En esas cenizas solamente pequeñas concentraciones de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y carbón (c) continúan (carbón no calcinado) presentes. Si los componentes químicos de las cenizas con propiedades puzolánicas se presentan en un diagrama de tres componentes (Rankin), los valores obtenidos resultan mucho muy juntos entre sí, este hecho proporciona la primera clave para los usos que le podemos dar a las cenizas. Esta información obtenida podría, sin embargo, solamente actuar como guía en la evaluación y no puede reemplazar a los ensayos tecnológicos más precisos.

Observaciones sistemáticas de la reacción de la ceniza volante en com-

binación con el agua y el cemento han mostrado que solamente los componentes vitrosos de la ceniza volante reaccionan con el hidróxido de sodio separado del cemento. Se forman hidratos de silicatos de calcio, principalmente como componentes de la nueva fase. Estos son los responsables de la resistencia desarrollada a las primeras edades. Aparte de éstos, también se forman hidratos de Ca-Al-Si y Ca-Al. Si el sulfato en la forma de  $\text{CaSO}_4$  (anhidrita) ocurre en la ceniza volante, entonces ésta reacciona en combinación con la cal. De acuerdo con nuestras investigaciones los hidratos de Ca-Si formados, no son productos uniformes, ya que su composición química cambia durante el período de reacción y depende del abastecimiento de cal. Los hidratos formados inicialmente muestran una alta relación  $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ . A medida que aumenta el período de reacción, la relación disminuye hasta que los hidratos de Ca-Si tienen la composición química hallada en el cemento hidratado (1) (Fotos 2, 3 y 4).

La cantidad de cal confinada y las fases nuevamente formadas, dependen de las proporciones originales de los componentes iniciales. Como puede verse en la Foto 6, la mayor cantidad de ceniza volante reacciona en mezclas que originalmente contienen entre un 30 y un 40% de hidróxido de calcio. Aquí, un máximo de 35% de ceniza volante reacciona mientras que el resto permanece en la mezcla como un componente no reactivo. La proporción absoluta de la ceniza volante activa depende de la proporción, la calidad y la fineza del material empleado. De esta manera, la ceniza volante entera (sin moler) tiene menor proporción de reacción que ambos componentes. Así mismo, menos cal reacciona dentro del mismo tiempo de reacción. Si uno compara el desarrollo de la resistencia de varias revolturas de ceniza volante y cal, la máxima resistencia se encuentra en las revolturas con un 30 ó 35% de ceniza volante. Aquí, también, se pueden encontrar diferencias en las proporciones de reacción de ceniza volante molida y sin moler con períodos comparables de reacción. La pérdida en resistencia es tanta debido a la pequeña proporción de reacción de la ceniza volante y al más bajo contenido de cal. Podemos concluir por lo tanto que el desarrollo de la resistencia está directamente determinado por la cantidad de ceniza volante activa y por el contenido de cal. Si la ceniza volante también contiene  $\text{CaSO}_4$  (anhidrita), la formación de etringita puede observarse cuando hay cal presente (2). En el ensayo llevado a cabo con cenizas volantes que contenían hasta un máximo de 5% de  $\text{SO}_3$  se observó una transformación completa de la etringita.

Las muestras de cemento con ceniza volante indican desarrollos de resistencia como sucede en las revolturas de ceniza volante y cal. Generalmente cuando al cemento Portland se le añade ceniza volante muestra un grado de resistencia más débil que el cemento Portland sin ceniza volante en un período de reacción que dure hasta 90 días (3). Con mayores períodos de reacción (e. g. 180 días) algunas revolturas muestran mayores resistencias a la compresión que se pueden comparar con concretos sin ceniza volante. La diferencia en resistencia a la compresión está determinada por la velocidad de mezclado, la fineza y la calidad de la ceniza volante.

La Foto 7 muestra la formación de la resistencia en concretos con ceniza volante y cemento Portland que contiene ceniza con propiedades puzolánicas. La resistencia del concreto con puro cemento Portland, sin ceniza, después de 360



días llegó a alcanzar un 100%.

Si este desarrollo en la resistencia se compara con el de los concretos que contienen un 40% de ceniza volante, las resistencias en todos los períodos de la reacción resultan del 15 al 20% por abajo de los valores previos. En revolturas que contienen más del 40% de ceniza volante, la resistencia se reduce considerablemente. Los valores de las revolturas hasta un 25% de ceniza volante resultaron justamente abajo de aquellos concretos que contenían cemento Portland sin ceniza. En períodos de reacción más cortos, la diferencia es mayor que en los más prolongados. Después de un período de reacción de 360 días la diferencia con el cemento Portland puro es marginal. Como en todos los concretos, aquellos con un contenido de ceniza de 30-35%, muestran menor resistencia después de cortos períodos de reacción, la diferencia disminuye a medida que el tiempo aumenta. Ya después de 180 días se alcanza el valor de cero, y es claramente excedido después de 360 días.

El grado de resistencia absoluto de las revolturas de ceniza volante depende de este modo de la calidad de la ceniza volante (proporción vitrosa), la fineza del material y la cantidad añadida (mezclada o molida). Esto puede observarse de los resultados que en la adición de ceniza volante combinada con cortos períodos de reacción tiene un efecto muy negativo en el desarrollo de la resistencia absoluta. Con períodos de reacción mayores la adición del 25 al 35% de ceniza molida con propiedades puzolánicas, resulta en un desarrollo de resistencia la cual corresponde a la del cemento puro.

El módulo de ruptura y el módulo de Young de los concretos con varias proporciones de ceniza volante en el aglomerante, corresponde con el desarrollo a la compresión.

Aparte del buen bombeado y la compactación, las calidades del concreto debido al uso de cementos con ceniza volante en concretos masivos, también es interesante el bajo calor de hidratación. El calor de hidratación desarrollado por un cierto cemento Portland (Pz 375) y dos diferentes tipos de ceniza volante (ceniza volante molida y sin moler) se muestra en la Foto 8. Las revolturas que contienen las siguientes proporciones de cemento: ceniza volante fueron ensayados: 100:0, 85:15, 70:30 y 55:45. Esto muestra que la pérdida en calor de hidratación cuando utilizamos el mismo cemento depende de la cantidad de aditivo y sólo de manera secundaria de la calidad de la ceniza. De este modo, el calor de hidratación del cemento Portland de 351 J/g disminuye a 329 J/g después de un período de reacción de 28 días bajo la adición de un 15% de ceniza molida. Si se le añade más de un 15% de ceniza, los valores se redujeron a 301 J/g. La adición del 45% de ceniza para el cemento dado, resulta en un calor de hidratación de 261 J/g. La proporción añadida, muestra que no existe una disminución lineal ya que las mayores proporciones de cemento nos conducen a menores pérdidas que en las revolturas con mayores proporciones de ceniza volante. Un aumento en la proporción de esta última nos conduce a una disminución adicional. Si se utiliza más ceniza gruesa molida con proporciones idénticas del mismo cemento Portland, el calor de hidratación desarrollado resulta ligeramente más bajo que el de ceniza finamente molida.

En todas las mezclas ensayadas la proporción reactiva de la ceniza volante actúa como una función de los contenidos añadidos y del período de reacción. De este modo, el calor de hidratación de la ceniza en revolturas con un 30% de ceniza volante resulta de 55 J/g, mientras que la cantidad contribuida por el cemento puede calcularse en 246 J/g. Podemos por lo tanto concluir que la ceniza volante utilizada como un aditivo puzolánico o molida con el cemento tiene que satisfacer ciertos requisitos, los cuales tienen que ser constantemente checados y ser demostrados.

#### REFERENCIAS

Lukas, W., "Reaktionsablauf bei einer Osterreichischen Flugasche mit Kalkhydrat", Tonindustrie Zeitung, 100, 10, 1976, S.358-362.

Lukas, W., "Kalkbindevermogen (Ca(OH)<sub>2</sub>) von Flugasche am Beispiel der Asche aus St. Andra/Lavanttal - Karnten", Mitteilungen aus dem Institut fur Baustofflehre und Materialprufung, 1975/76, S.33-34.

Lukas, W., "Untersuchungen uber die Reaktionsablaufe im System Flugasche-Kalkhydrat und Flugasche-Zement mit Wasser", Habilitationsschrift, 1975, S.1-366.

Blumel, O. W., Lukas, W., "Der Einfluß der Flugasche auf die Festigkeitsentwicklung und den Reaktionsablauf in Portlandzementgemischen", Material und Technik, 5, 1977.

Lukas, W., Rock, R., Hagleitner, "Energiedispersiv-analytische Untersuchungen an Ettringiten in Zementleimproben", Zement-Kalk-Gips, 7, 1977, S.328-330.

Lukas, W., "Energydispersive analysis of ettringites in cement paste samples", Zement-Kalk-Gips, 9, 1977, S.204-205.