



Fig. 1. Resistencia y compresión de concretos con 300 kg de cemento por m³ de concreto en los que se ha sustituido diferentes

EL USO DE CENIZA VOLANTE EN EL COLADO DEL CONCRETO MASIVO.

D. Bilewicz

RESUMEN

La adición de puzolanas artificiales a cementantes hidráulicos en el colado del concreto masivo es común tanto en Austria como en otros lugares desde hace algún tiempo.

Después de haber obtenido previamente buenos resultados en presas, usando escoria de alto horno como una puzolana artificial, los ingenieros austriacos intentaron por primera vez utilizar las propiedades de la ceniza volante en la construcción de la presa Kolnbrein, esta ceniza es el producto residual de las plantas generadoras de energía que funcionan con carbón café.

Primeramente se esperaba un ahorro en el cemento caro, así como una reducción y una generación lenta del calor de hidratación, el cual provoca muchos problemas en el colado del concreto masivo. Los requerimientos para el concreto eran obvios, tales como una flexión adecuada, resistencia a la compresión, resistencia a la helada, un factor bajo de contracción, buena manejabilidad y homogeneidad. Además de los actuales interrogantes tecnológicos; las dimensiones de proyecto y su localización en los Altos Alpes causaron problemas adicionales.

Durante los meses de verano, por ejemplo, aproximadamente 1000 tons. de cemento, 500 tons. de ceniza volante y 13000 tons. de agregado tuvieron que ser producidos y transportados para lograr una cantidad promedio de colado de concreto de 6000 m³ por día. (El máximo fue de 12000 m³ por día).

1.- CEMENTO

Los requerimientos hechos por el cliente sobre el cemento (sin ceniza volante) fueron como sigue:

Calor de hidratación (según la A.S.T.M.; 7 días) menos de 80 calorías/gramos, resistencia a la flexión (según la norma austriaca B 3310; 7 días) más de 60 kg/cm², la resistencia a la compresión (según la B 3310; 28 días) más de 430 kg/cm².

Varios de los ensayos demostraron que moliendo un clinker de cemento Portland normal a una fineza en particular, no era alcanzable un bajo calor de hidratación con una resistencia a la flexión relativamente alta a edad temprana. Este fue el caso, porque una fineza con un alto molido aumenta la resistencia a la flexión y también aumenta el calor de hidratación. La solución para el problema, fue utilizar un clinker especial de cemento con un contenido reducido de C₃A, el cual fue molido para una superficie específica de 3600 cm²/gramos. La tabla No. 1 muestra claramente que la tolerancia límite prescrita puede ser aparentemente alcanzada a pesar de todos los esfuerzos (en 1976 se colaron aproximadamente 830,000 m³).

2.- CENIZA VOLANTE

Posterior a la selección de la ceniza volante con las propiedades técnicas más favorables, la cual se encontraba disponible en cantidad suficiente y con homogeneidad, -la pregunta decisiva era una técnica y otra financiera- como aclarar el contenido óptimo de la ceniza volante. Como se puede ver sistemáticamente en la Figura 1, la resistencia, especialmente en período tempranos disminuye con el incremento de contenido de ceniza volante. El calor de hidratación producido disminuye lo mismo que los valores de resistencia. Para la optimización de la cantidad de ceniza volante, la siguiente consideración fue importante: en el proceso de hidratación del cementante la mayor parte del calor se produce durante los primeros días, con lo cual los esfuerzos mecánicos resultantes de la presión del agua y otros no han ocurrido todavía. Las distribuciones desiguales y no lineales de la temperatura, las cuales ocurren en estructuras de grandes dimensiones originando esfuerzos de tensión y compresión, especialmente en los períodos iniciales. El esfuerzo de tensión puede ser excedido y causar de esta manera la formación de grietas debidas a la tensión. Para una edad o período en particular y límites térmicos estipulados, es posible establecer un factor de seguridad contra la formación de tales grietas en base a un modelo matemático. Este factor de seguridad es también importante para la selección de la cantidad de ceniza volante. Los detalles matemáticos de este modelo no serán discutidos en este trabajo.

En el cálculo de este factor de seguridad se vio que el máximo fue alcanzado con un contenido de 30% de ceniza volante. Puesto que con esta dosis en particular los valores de los esfuerzos se excedieron de los valores prescritos, la proporción de ceniza volante a cemento de 30:70% fue estimada como óptima, y

se ha utilizado para el diseño de los proporcionamientos de concretos.

3.- MEZCLADO DEL CEMENTANTE HIDRAULICO.

Los primeros ensayos con ceniza volante han demostrado que es imposible lograr una distribución homogénea en el concreto con aplicación directa de ceniza volante en la revolvedora. El cementante hidráulico tuvo que ser homogeneizado primero. Un molido simultáneo de la ceniza volante con el clinker de cemento Portland no fue la solución, porque la primera alcanza una superficie específica muy alta (más de 6000 cm²/g). Esto conduce a dificultades para la inclusión de burbujas finas de aire, necesarias para la resistencia contra el ataque de las heladas. También el contenido de agua necesario para un grado adecuado de manejabilidad llega a ser mayor (origina menor resistencia). La solución técnicamente perfecta en este caso, también la ofrecieron los beneficios económicos originados por rutas de transporte relativamente cortas. La preparación de la ceniza volante, se realizó mediante una planta de secado y un molino construido especialmente para alcanzar una superficie específica de cerca de 4900 cm²/g. -- También fue construida una planta para homogeneización o mezclado, cercana a una estación de ferrocarril localizada muy cerca del sitio de construcción. Esta planta contenía el aire comprimido necesario para la transferencia de los dos tipos de cemento a los recipientes, así como también para la homogeneización de los cementantes. Como puede ser visto en la Tabla 2, el resultado favorable justificó los costos. La diferencia en el contenido de ceniza volante en varias áreas del recipiente ascendió a no más del 2%.

4.- AGREGADO.

Puesto que los agregados no eran disponibles de depósitos naturales en la cercanía de la presa, estos tenían que ser obtenidos de una cantera localizada en zonas algo más altas para después ser preparadas. Esto fue para curvas de graduación gruesa y un contenido de arena relativamente bajo, especial importancia se atribuye al contenido de arena fina, debido a su influencia en la manejabilidad e inclusión de burbujas de aire, se llevó a cabo una separación adicional de arena para un grano con un tamaño de 1 mm. La curva granulométrica que resultó de 6 fracciones preparadas (cribado-húmedo) se muestra en la Figura 2.

5.- LOS CONCRETOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR LA PRESA.

Después de la determinación exacta de la composición de los concretos fue posible mantener los proporcionamientos a un costo relativamente bajo como se muestra en la Tabla 3 y la Figura 3, para los 4 contenidos de cementante fueron determinadas las relaciones agua/cemento para lograr una manejabilidad suficiente (Factor de compactación 1.27-1.29) indistintamente, el aditivo sirvió tanto para incluir aire como para aumentar la manejabilidad.

Continuando con el estudio de desarrollo de resistencia, 2 cantidades

de cementante hidráulico fueron seleccionadas para el inicio del colado en el año de 1975. (260 kg para el concreto de la pared exterior y 200 kg para el concreto del centro).

La comprobación puede darse para la resistencia contra el ataque de las heladas y para impermeabilidad del agua del concreto en la pared exterior (ver Figura 4).

6.- REDUCCION DEL CONTENIDO DEL CEMENTANTE.

La cantidad de un cementante caro tiene una influencia decisiva sobre el costo total de un proyecto de esta magnitud. Desde un punto de vista tecnológico, hubo varias posibilidades para la reducción de la cantidad de cementante hidráulico. Es bien conocido que para la producción de concreto en estructuras de gran volumen es muy favorable establecer no solamente el valor medio de resistencia, sino también un factor de probabilidad y estadística, el cual no debe ser más bajo que un valor mínimo. En el caso bajo consideración, la resistencia a la compresión mínima después de 180 días para la pared exterior y el centro, fue respectivamente de 300 y 220 kg/cm², y dio un factor de probabilidad del 90%. La Fig. 5 indica el valor medio actual establecido para la resistencia tiene que ser mayor que el valor que dependa de la desviación estándar. En el caso de los ingredientes de concreto prescritos, un ahorro en el cemento y por lo tanto del dinero, es posible solamente cuando la desviación estándar se reduce, por ejemplo cuando se produce concreto de calidad homogénea. El requisito previo para esto desde luego, es la calidad de homogeneización de los cementantes, de los agregados; así como observar exactamente la relación agua/cemento planeada en la fábrica de concreto. Mientras que una verificación de la curva granulométrica del agregado y las correcciones posibles, pueden hacerse rápidamente en el sitio de la construcción, la aplicación de las técnicas de ensaye acostumbradas, para el cementante tales como los ensayos de resistencia y los ensayos para la determinación del calor de hidratación, los resultados solamente los podemos obtener después de un cierto tiempo. Por consiguiente un método efectivo e inmediato para verificar el cemento es difícilmente posible. Los ensayos establecidos para realizarse en el cemento bajo consideración, muestran que los cambios en la composición química y en la superficie específica influyen fuertemente en el desarrollo temporal de la producción de calor. En un instrumento simple pero muy efectivo, la relación entre la temperatura y un tiempo fue continuamente medida y después comparada con la curva estándar. Este instrumento, consiste básicamente de un receptáculo el cual está muy bien aislado contra el calor y el cual contiene una cantidad específica de mortero de cemento. Una vez que el receptáculo ha sido sellado, la producción de calor en el mortero se mide con un termómetro eléctrico y se registra sobre una gráfica. Como puede ser visto en la Fig. 6, tal curva muestra un máximo después que la temperatura comienza a disminuir. Mientras que este método no provee datos cuantitativos acerca del calor de hidratación, por ejemplo como el determinado por la ASTM, o acerca del desarrollo de resistencia, es posible sin embargo reconocer las desviaciones en el cemento de la composición planeada dentro de unas pocas horas y analizar sus causas sobre la base de, por ejemplo, ensayos químicos. A la temperatura constante del laboratorio el instrumento funciona tan exactamente que las desviaciones en el conte-

nido de ceniza volante del cementante mezclado de más del 2% son medidas inmediatamente. El siguiente ejemplo puede servir para ilustrar la relación estricta entre temperatura y calor de hidratación de acuerdo a la ASTM en la fabricación del concreto en el año de 1976.

$$\text{Temperatura máxima} = \frac{\text{Valor Medio}}{34.1^{\circ}\text{C}} \quad \frac{\text{Desviación Estándar}}{0.9^{\circ}\text{C}} = 2\%$$

Calor de hidratación

$$\text{(Después de 7 días según la ASTM)} \quad 69.9 \text{ cal/g} \quad 0.8 \text{ cal/g} = 1.1\%$$

Uno de los problemas tecnológicos más importantes es poder mantener la relación agua/cemento durante la producción del concreto. Puesto que el contenido de agua de los agregados fluctúa, especialmente el de la humedad de la arena, este factor tiene que ser continuamente determinado y tomarlo en cuenta cuando se agrega el agua. Aquí un efecto físico nuclear fue de ayuda en la medición del contenido de agua: Neutrones ricos en energía radiados de una fuente radioactiva, en este caso, ²⁴¹Am - Be son disminuidos principalmente por núcleos de hidrógeno en su vecindad, mientras que un núcleo pesado no tiene influencia.

Un detector especial desarrollado para registrar lentamente los neutrones pobres en energía, emiten una señal la cual depende de la cantidad de hidrógeno cercano a la fuente de radiación y el detector, el cual permite inferencias, como el contenido de agua. Con los átomos de hidrógeno del agregado húmedo, tanto el agua de cristalización y los iones químicamente ligados de OH dan un indicador aparente, de modo que una normalización adecuada es absolutamente indispensable.

En los ensayos preliminares en cuanto a la aplicabilidad de este método, se vio que los valores reproducidos para el contenido de agua de la arena, fueron posibles solamente con la consideración de la densidad de la capa durante el rango de medición de la prueba. Fue por esta razón que para los 2 recipientes de arena (0.1/1 mm y 1/4 mm) se planeó una unidad de medición automática adicional para la densidad, con la ayuda de una fuente de radiación gama de ¹³⁷Cs. Se usó una computadora para coleccionar continuamente todos los datos relacionados con la humedad de la superficie y la densidad de la capa, para calcular las cantidades requeridas de agregado, cementante y agua para el diseño del proporcionamiento deseado, también para controlar el equipo de pesado las unidades para dosificar el agua y los distribuidores de agregado en los recipientes, así como para señalar, dado el caso que la densidad actual del concreto fresco se aleje mucho del valor de diseño. Además de todas estas funciones, la misma computadora también conserva un récord estadístico de la producción. Este método de producción de concreto ciertamente permanece sin igual y los resultados han sobrepasado todo lo esperado. Como un ejemplo, el tipo de concreto más usado durante el año 1976 (concreto del centro, de 190 kg de cementante por m³) se da a continuación:

Redeterminando la relación agua/cemento : entre 0.690 y 0.698

Valor medio:	0.694
Relación A/C de un ensaye adecuado	0.71