

### 2.3.6 Contenido de humedad en la entrega

Los depósitos de las cenizas de la planta de Nava, estando a la intemperie, presentaron contenidos elevados de humedad, 17.1, 16.3 y 12.5 por ciento en las muestras 1, 2 y 3, respectivamente, tabla 2. Esta puede ser otra de las razones por la que en los ensayos de actividad puzolánica con cal, los resultados encontrados fueron inferiores al límite mínimo de resistencia especificada.

El análisis químico presentado en la tabla 2, registra humedades muy pequeñas, inferiores a 0.41 por ciento, debido a que las muestras utilizadas -- para este efecto fueron secadas previamente.

## PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS CEMENTOS PUZOLANICOS

### 3.1 Descripción de los ensayos

Se le llamará cemento puzolánico a la mezcla de cemento Portland tipo I y ceniza volante, incluida en diferentes proporciones y homogeneizada mediante un mezclado mecánico.

Para fabricar los cementos puzolánicos se empleó ceniza proveniente de la muestra 1, por ser la que presentaba mayor finura y mayor índice de actividad puzolánica con cal. Sin embargo, siendo relativamente gruesa esta ceniza, se le dió una molienda en molino con bolsas de porcelana, incrementando la finura de manera que el contenido de material retenido en malla de 45  $\mu$ m (#325) pasó de 39 a 24 por ciento, y la actividad puzolánica con cal de un valor de 33 a 36 kg/cm<sup>2</sup>. La norma ASTM C 595 (Cementos hidráulicos mezclados) especifica una finura para la puzolana de 20 por ciento de material retenido en la malla de 45  $\mu$ m y un índice de actividad puzolánica con cal de 56 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a -- compresión; como se observa en la tabla 1, ninguna de estas características se alcanzó en las muestras ensayadas.

No obstante lo anterior, siendo el cemento Portland más fino que la ceniza (16 por ciento de material retenido en malla de 45  $\mu$ m), se estimó que la mezcla de ambos materiales conduciría a un cemento puzolánico que cumpliría con el aspecto de finura. El índice de actividad puzolánica con cal (56 kg/cm<sup>2</sup>) es un parámetro difícil de cumplir con la mayoría de los materiales puzolánicos; -- sin embargo, habiendo alcanzado la ceniza un índice satisfactorio de actividad puzolánica con cemento Portland, aún en el caso de ceniza sin moler, se estimó que podría tener un comportamiento aceptable como cemento puzolánico.

Tomando en consideración que las cantidades de ceniza que se recomienda utilizar en la elaboración de concretos puzolánicos a partir de cemento Portland tipo I varían entre 15 y 40 por ciento del peso del cemento, se formaron -- tres muestras diferentes con contenidos de ceniza de 15, 25 y 40 por ciento, -- los que se marcaron como cemento 1, 2 y 3, respectivamente.

El mezclado de la ceniza y el cemento se hizo en forma mecánica, homogeneizando el cemento con vueltas sucesivas en el recipiente del molino de bolas.

### 3.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las tres muestras de cemento puzolánico ensayadas se presentan en la tabla 3. Aquí los resultados se comparan con límites establecidos por la especificación ASTM C 595 y se hacen algunos comentarios -- respecto a las diferencias entre estos cementos y los cementos Portland.

#### 3.2.1 Finura

Siendo la finura un índice de la rapidez con que se puede hidratar el cemento, es importante conservarla en valores altos para que la adquisición de resistencia mecánica no sea demasiado lenta, cuando menos por este efecto.

Los cementos puzolánicos ensayados presentaron cantidades retenidas -- en las mallas de 45  $\mu$ m, de 18, 18 y 21 por ciento para los cementos 1, 2 y 3 -- respectivamente. La especificación ASTM C 595 recomienda un retenido máximo -- del 20 por ciento para los cementos IP o P, que son los tipos en que podrían -- quedar clasificados, por lo que de las muestras ensayadas, los cementos con 15 y 25 por ciento de cenizas cumplirían con este requisito, quedando fuera el cemento con 40 por ciento de ceniza. Otra forma de medir la finura de los cementos es por medio de una prueba de permeabilidad al aire. Se establece un mínimo de 2600 cm<sup>2</sup>/gr para los cementos puzolánicos. En los tres cementos ensayados se alcanzaron valores muy superiores al mínimo y semejantes a los medidos -- en el cemento Portland tipo I utilizado (tabla 3).

#### 3.2.2 Expansión en autoclave

Una vez que la pasta de cemento ha fraguado, es necesario que no sufra cambios volumétricos grandes. En particular, no debe haber una expansión tal -- que bajo condiciones restringidas, pueda originar una rotura de la pasta de cemento endurecida. Esta expansión puede deberse a una hidratación retardada o -- lenta u otra reacción presente en el cemento endurecido debido principalmente a la cal libre, a la magnesia y al sulfato de calcio.

Las diferentes muestras estudiadas condujeron a resultados muy inferiores al que se establece como límite superior y se notó una disminución en la expansión con el aumento en el consumo de ceniza, al grado de que con 40% de este material se presentó una contracción en vez de expansión, tabla 3.

#### 3.2.3 Tiempo de fraguado

Todas las mezclas ensayadas presentaron un comportamiento satisfactorio en cuanto a los límites establecidos por la norma ASTM C 595. Los cementos con 15, 25 y 40 por ciento de ceniza volante tuvieron tiempos de fraguado inicial y final superiores a los alcanzados por el cemento Portland.

A medida que mayores fueron los consumos de cenizas mayores fueron -- también los tiempos de fraguado.

### 3.2.4 Resistencia a compresión

Las muestras de cemento con 15 y 25 por ciento de ceniza, alcanzaron resistencias superiores a los valores mínimos especificados por la norma correspondiente, excepto en un caso (25% a 14 días), tabla 3. La incorporación de 15 por ciento de ceniza redujo la resistencia del cemento, obteniendo valores de 64, 73 y 79 por ciento de las respectivas resistencias del cemento Portland a las edades de 3, 7 y 28 días. Con 25 por ciento de ceniza, los porcentajes alcanzados fueron 55, 61 y 71 por ciento de la resistencia de los cementos Portland para 3, 7 y 28 días de edad, respectivamente.

Se observa de los valores anteriores que las diferencias más grandes se presentan a las edades tempranas, siendo más pequeñas la diferencias con el tiempo.

Los cementos a los que se les incorporó 40 por ciento de ceniza, no alcanzaron la resistencia mínima especificada por la norma ASTM C 595, presentando una resistencia promedio equivalente a 45 por ciento de la resistencia a compresión del cemento Portland.

### 3.2.5 Calor de hidratación

El método más comúnmente utilizado para determinar el calor de hidratación es por medición del calor de solución de cemento sin hidratar e hidratado en una mezcla de ácidos nítrico e hidrófluorhídrico; la diferencia entre los dos valores representa el calor de hidratación.

Las determinaciones efectuadas a las muestras de cemento con ceniza -- se hicieron con la ayuda de un calorímetro diferencial habiéndose encontrado -- que la adición de cenizas reduce sustancialmente el calor de hidratación del -- cemento, especialmente en la etapa inicial. El calor de hidratación a la edad de siete días en las tres muestras de cemento fue inferior al que se determinó para el cemento Portland tipo I (17.2 microcal/mg); para la edad de 28 días el calor de hidratación de los cementos puzolánicos resultó también inferior al -- del cemento Portland, pero la diferencia fue menor (ver tabla 3).

### 3.2.6 Reactividad potencial con los álcalis

La reactividad potencial entre los álcalis del cemento y los materiales silíceos de los agregados se determina usualmente por medio de la expansión que se presenta en barras de mortero al reaccionar estos materiales.

Se ha encontrado que la expansión debida a la reacción álcali-agregado puede reducirse o eliminarse agregando a la mezcla sílice reactiva en forma de partículas finamente divididas. Esta paradoja puede explicarse de la sigui-

ente forma: en el rango de contenidos bajos de sílice, a medida que se incrementa el contenido de sílice, para una cantidad dada de álcalis, se incrementa también la expansión, pero con contenidos de sílice más grandes la situación se invierte. A medida que es mayor el área disponible del agregado reactivo, menor es la cantidad de álcalis disponibles por unidad de área y menor cantidad -- de gel álcali-sílice puede formarse.

Los resultados encontrados confirman lo anterior. La mezcla testigo tuvo una expansión aproximada de 0.12 por ciento a los 14 días de edad, en tanto que los morteros hechos con cemento con 25 y 40 por ciento de ceniza presentaron expansiones mucho más pequeñas a la misma edad. A las 8 semanas el mortero sin ceniza volante presentó una expansión de 0.38 por ciento, en tanto que las mezclas que incluyeron ceniza presentaron una expansión alrededor de 0.05% siendo la máxima expansión permitida de 0.06%.

Lo anterior permite concluir que con la adición de las cenizas en estudio se inhibe la reacción álcali-agregado.

### 3.2.7 Contracción por secado

Para efectos prácticos el problema de la contracción por secado es -- importante por estar directamente relacionado con la tendencia al agrietamiento. La presencia o ausencia de grietas depende no solamente de la contracción potencial del concreto, sino también de su deformabilidad, su resistencia y el grado de restricción a la deformación.

Los resultados encontrados indican que la adición de ceniza no tuvo -- efecto significativo en la contracción; las contracciones medidas fueron en todos los casos del mismo orden a la encontrada para la mezcla testigo sin ceniza, aproximadamente igual a la mitad de la máxima permitida (tabla 3).

## 3.3 Propiedades químicas

Las características químicas de los cementos puzolánicos estudiados -- se presentan en la tabla 4. Además de las características sobre las cuales la norma ASTM-C-595 presenta restricciones, se incluyen otras determinaciones que se consideran necesarias para la estimación de los compuestos más importantes -- del cemento.

### 3.3.1 Trióxido de azufre

Las determinaciones efectuadas en las muestras de cemento con diferentes porcentajes de ceniza condujeron a valores de  $SO_3$  inferiores a 4 por -- ciento, valor considerado como máximo aceptable por la norma ASTM-C-595. Se -- observó que al aumentar los consumos de ceniza, aumenta también el contenido -- de  $SO_3$ ; así para la muestra con 15 por ciento de ceniza el contenido de  $SO_3$  -- fue de 2.08 por ciento y para la muestra con 40 por ciento de ceniza el valor alcanzado fue de 2.80 por ciento.

Los ensayos efectuados indicaron contenidos de MgO de 0.38, 0.15 y -- 0.10 por ciento para las muestras con 15, 25 y 40 por ciento de ceniza, respectivamente. La norma ASTM-C-595 establece un límite máximo de 5 por ciento para los cementos puzolánicos, muy superior a los valores alcanzados. Como se puede observar, a medida que aumenta el consumo de ceniza, la cantidad de óxido de -- magnesio disminuye, siendo por tanto favorable la incorporación de la ceniza -- para la reducción de los cambios volumétricos por este efecto.

### 3.3.3 Pérdida por calcinación

Las pruebas efectuadas en las muestras de cemento con cenizas indicaron pérdidas por calcinación de 2.01, 2.38, 2.77 por ciento para las muestras -- con 15, 25 y 40 por ciento de ceniza, respectivamente. La norma ASTM establece un límite máximo de 5 por ciento para que se considere satisfactorio el comportamiento de estos cementos. Como era de esperarse, a medida que aumenta el contenido de ceniza, aumenta también la pérdida por calcinación.

## MORTEROS SILICO-CALCAREOS

Con objeto de determinar la posibilidad de emplear las cenizas de la planta de Nava para la fabricación de concretos y morteros sílico-calcáreos, se hizo una serie de ensayos exploratorios para ver si existe reacción favorable -- entre la sílice de las cenizas y el hidróxido de calcio (cal hidratada) que comúnmente se puede adquirir en el mercado. La evaluación del comportamiento se basa únicamente en la resistencia a compresión, obtenida del ensaye de cubos de mortero de 5.1 cm de lado.

### 4.1 Proporcionamientos

Las mezclas estudiadas tuvieron como variable principal el consumo de cal, empleándose cantidades que variaron entre 76 y 240 kg por m<sup>3</sup> de mortero. -- También se consideró como variable la ceniza, empleándose consumos que variaron entre 0 y 100 por ciento en peso del total del agregado empleado.

El consumo de agua fue también variable y dependió de la finura de -- los materiales empleados. En todos los casos se buscó tener una mezcla de una consistencia tal que pudiese ser fácilmente compactada por vibración externa. -- Los consumos variaron entre 138 y 390 l por m<sup>3</sup> de mortero.

En total se prepararon 12 mezclas cuyas características se presentan en la tabla 5.

### 4.2 Fabricación y curado

Los especímenes, cubos de 5.1 cm de lado, se fabricaron compactando -- primero la mezcla con pizón, en dos capas, y posteriormente vibrándola a 3000 -- vpm durante 1 minuto en dos periodos de 30 segundos cada uno. La consistencia

de la mezcla y la compactación aplicada fueron suficientes para que los especímenes pudieran descimbrarse inmediatamente después de su compactación, sin sufrir ningún deterioro externo visible.

El curado aplicado se dividió en dos partes: primero, un curado de -- horno a 40°C durante 24 h, para evaporar un porcentaje elevado del agua de mezclado con el fin de evitar el agrietamiento de los especímenes durante la segunda etapa de curado. Esta última consistió en curar en autoclave los especímenes de ensaye por un lapso de 6 h. Durante la primera hora se elevó la temperatura a 300°C y 21 atm de presión, manteniendo esta condición de curado durante cuatro horas y posteriormente se enfrió y bajó la presión en un lapso de una hora.

Los ensayos a compresión se efectuaron aproximadamente 30 h después -- de fabricados los especímenes.

### 4.3 Resistencia a compresión

De la mezcla 1 a la 5, tabla 5, los consumos de cal variaron entre -- 189 y 250 kg/m<sup>3</sup> y los consumos de ceniza entre 0 y 100% del peso total de los agregados, considerando como tales tanto a la arena como a la ceniza. Dentro de este grupo de mezclas se puede observar que las resistencias a compresión fueron superiores a 87 kg/cm<sup>2</sup>; este valor mínimo corresponde a los morteros hechos únicamente con ceniza volante y consumos de cal del orden de 195 kg/m<sup>3</sup>. También se puede observar que a medida que aumenta el consumo de cal se incrementa la resistencia.

De las mezclas 6 a la 12 se emplearon consumos de cal que variaron -- entre 76 y 133 kg por metro cúbico de mortero y los consumos de ceniza entre 0 y 100 por ciento del peso del total de los agregados. Las resistencias a compresión alcanzadas fueron inferiores a las del primer grupo de resultados, pero suficientemente altas para emplear los materiales resultantes en aplicaciones -- no estructurales.

En síntesis se puede decir que los materiales silicocalcáreos elaborados con ceniza volante pueden emplearse, de acuerdo con las pruebas preliminares efectuadas, en un gran número de aplicaciones; desde elementos no estructurales, como pueden ser celosías, o tabiques para muros divisorios, hasta elementos que requiere de altas resistencias a compresión en el mortero como puede -- ser el de vigas, postes, losas, etc., prefabricados que cumplan diferentes funciones estructurales. La posibilidad de reforzar estos materiales es otro aspecto que requieren de estudios posteriores.

## CONCRETOS PUZOLANICOS

Con objeto de conocer el efecto de las cenizas volantes en los concretos de cemento Portland, se fabricaron dos series de mezclas.