

En español

## Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados

Claudia Patricia Valderrama<sup>1</sup>,  
Janneth Torres Agredo<sup>2</sup>, Ruby Mejía de Gutiérrez<sup>3</sup>

### RESUMEN

La ingeniería de hoy en día exige que las estructuras sean resistentes y durables, siendo esta última cualidad un factor determinante durante el diseño y la construcción de ella. En dicho sentido, el desarrollo de nuevos materiales cementantes y el mejoramiento de las propiedades de los concretos tradicionales, específicamente la reducción de la permeabilidad, mediante la incorporación de materiales tales como las puzolanas, continúa siendo objeto de estudio por parte de la comunidad científica. En el presente trabajo se analiza el efecto de las propiedades de resistencia mecánica a compresión, absorción capilar y permeabilidad a cloruros de un concreto adicionado con cenizas volantes (CV), y se compara su comportamiento respecto a mezclas adicionadas con humo de sílice (MS). Para el caso de las cenizas volantes, se encontró un porcentaje óptimo del 10% para las resistencias mecánicas; sin embargo, incrementos en la adición dan lugar a efectos positivos en las propiedades de durabilidad. En comparación con el humo de sílice, las cenizas volantes mostraron un desempeño inferior para todas las propiedades evaluadas.

**Palabras claves:** cenizas volantes, humo de sílice, concreto, durabilidad, permeabilidad, resistencia a la compresión.

**Recibido:** septiembre 11 de 2009  
**Aceptado:** enero 30 de 2011

### Introducción

Una puzolana se define como "un material silíceo o sílico-alumínico que, una vez pulverizado, tiene la capacidad de reaccionar químicamente en presencia de agua, con hidróxido de calcio a temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades hidráulicas" (NTC 2004). Entre las adiciones al concreto que poseen actividad puzolánica se encuentran el humo de sílice, compuesto básicamente por sílice amorfa, proveniente de la industria del ferrosilicio; y las cenizas volantes (CV), el cual es un residuo contaminante obtenido durante la combustión del carbón en centrales termoeléctricas y calderas industriales.

In English

## A high unburned carbon fly ash concrete's performance characteristics

Claudia Patricia Valderrama<sup>4</sup>,  
Janneth Torres Agredo<sup>5</sup>, Ruby Mejía de Gutiérrez<sup>6</sup>

### ABSTRACT

Engineering today requires that structures are strong and durable; the latter concept is a decisive factor in their design and construction. The scientific community continues developing new cementitious materials and improving traditional concrete's properties, specifically reducing permeability by incorporating materials such as pozzolans. This paper analyses the effect of fly ash (FA) added to concrete on mechanical strength regarding compression, capillary absorption and chloride permeability and their behaviour compared to concrete containing silica fume (SF). An optimum 10% mechanical strength was found for fly ash; however, this increased with addition, resulting in positive effects on durability. Fly ash had lower performance for all properties evaluated when compared to silica fume.

**Keywords:** Fly ash, silica fume, concrete, durability, permeability, compressive strength.

**Received:** september 11th 2009  
**Accepted:** January 30th 2011

### Introduction

A pozzolan is defined as being "a siliceous material or silica-alumina which, once powdered, is able to react chemically with calcium hydroxide in the presence of water at room temperature to form compounds possessing hydraulic properties" (NTC, 2004). Silica fume (SF) is a concrete additive having pozzolanic activity, being mainly composed of amorphous silica from the ferrosilicon industry and fly ash (FA), which is a contaminant residue obtained during coal-fired utility and industrial boiler combustion.

<sup>1</sup> B.Sc., Ingeniería Civil. Estudiante de M. Sc., en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. cpvalderramap@unal.edu.co.

<sup>2</sup> Ph.D., en Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Grupo de investigación Materiales y Medio Ambiente, GIMMA.

<sup>3</sup> Ph.D. en Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, España. Profesor Titular, Universidad del Valle, Colombia- Grupo de investigación Materiales Compuestos (CENM)

<sup>4</sup> B.Sc., Civil Engineering. Student M.Sc., in Structures, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. cpvalderramap@unal.edu.co.

<sup>5</sup> Ph.D., in Engineering, Universidad del Valle, Colombia. Associate professor, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Materials and Environment Research Group. GIMMA

<sup>6</sup> Ph.D., in Chemical Sciences, Universidad Complutense de Madrid, Spain. Permanent professor, Universidad del Valle, Colombia. Composite Materials Research Group (CENM)

Las características químicas de las CV dependen del tipo de carbón que las originan y de las variables del proceso de combustión donde se generan, tales como temperatura, tiempo de residencia del carbón, entre otras (Ahmaruzzaman, 2010). Por tanto, es un producto bastante heterogéneo, compuesto principalmente por sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y en menor proporción presenta óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y de calcio ( $\text{CaO}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) y álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) (Canals, 2007). Es importante resaltar que la actividad puzolánica de CV depende principalmente del tipo y cantidad de fase vítrea, de la finura, de sus componentes mineralógicos, de la morfología de sus partículas y del nivel de inquemados o materia orgánica presente expresada como la pérdida al fuego de éstas (Mehta, 1989). Acorde a lo anterior, la incorporación de CV al cemento afecta las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, y pueden llegar a modificar su durabilidad. Entre las ventajas se tienen: incremento en la trabajabilidad, disminución de la permeabilidad (Lorenzo, 1993), reducción del calor de hidratación, aumento de las resistencias mecánicas a largo plazo (Bouzoubaa, 1993; Raghu, 2008; Naik, 1998) y buen desempeño frente a ambientes agresivos (Mehta, 1989; Gopalan, 1996; Sahmaran, 2009; Alhozaimy, 1996; Amapadu, 2002), entre otras propiedades (Ahmaruzzaman, 2010).

Este artículo muestra los resultados de la evaluación del desempeño mecánico y la durabilidad de concretos adicionados con CV procedente de una termoeléctrica ubicada en el departamento de Boyacá, los cuales se comparan con los obtenidos al utilizar una puzolana comercial como el humo de sílice.

## Materiales y procedimiento experimental

La ceniza volante (CV) utilizada para el estudio proviene de la Central Termoeléctrica Termopaipa IV, ubicada en el municipio de Paipa. En la tabla 1 se presentan las características químicas y físicas del cemento utilizado (Portland tipo III) y de la ceniza volante (CV). A partir de los resultados del análisis químico de las CV, y teniendo en cuenta la norma ASTM C618 o su equivalente (NTC 3493), este material corresponde a una ceniza tipo F. Es de resaltar el contenido elevado de inquemados presentes en la CV (10,68%), valor que supera el especificado en la norma (6%). Al respecto, la misma norma afirma que se puede emplear CV clase F con contenidos de hasta el 12% si se cuenta con registros o resultados de ensayos de laboratorio aceptables. Acerca del efecto del carbón inquemado en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de concretos adicionados con CV, se han reportado resultados diversos (Ha, 2005; Pedersen, 2008; Ahmaruzzaman, 2010), y en términos generales se estima que este valor debe ser máximo de un 8%. Otro material utilizado en el presente estudio fue humo de sílice (MS), que fue suministrado por un proveedor comercial.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad se elaboraron mezclas de concreto adicionadas con CV (10, 20 y 30%) y MS (10%) como reemplazo del cemento. Los agregados utilizados son de origen aluvial; el agregado grueso de tamaño máximo nominal es de 12,7 mm, densidad nominal de 2.624  $\text{kg/m}^3$ , peso unitario de 1.438  $\text{kg/m}^3$  y absorción de 3,1%.

FA's chemical characteristics depend on the type of coal from which it came and combustion variables, such as temperature, coal burning time (Ahmaruzzaman, 2010). It is a highly heterogeneous product, mainly consisting of silica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and ferric oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) and, to a lesser extent, magnesium oxide ( $\text{MgO}$ ), calcium ( $\text{CaO}$ ), sulphate ( $\text{SO}_3$ ) and alkalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ ) (Canals, 2007). It should be stressed that FA pozzolanic activity mainly depends on glassy phase type and amount, mineral component fineness, particle morphology and the level of unburned carbon or organic matter expressed as its loss of ignition (LOI) (Mehta, 1989). According to the above, adding FA to cement affects fresh and hardened concrete properties and may modify their durability. Its advantages include increased workability, reduced permeability (Lorenzo, 1993), reduced hydration heat, increased long-term mechanical strength (Bouzoubaa 1993, Raghu 2008, Naik 1998) and good performance in aggressive environments (Mehta 1989, 1996 Gopalan, Sahmaran 2009, Alhozaimy 1996, Amapadu, 2002, Ahmaruzzaman, 2010).

This article gives the results of evaluating the mechanical and durable performance of blended concretes with FA from a power plant located in the Boyaca Department, Colombia. This was compared to that obtained using a commercial pozzolan, such as silica fume.

## Materials And Experimental Procedure

The fly ash (FA) used for the study came from the "Termopaipa IV" power plant in the town of Paipa. Table 1 shows the chemical and physical properties of the cement (type III Portland) and fly ash (FA) used. FA chemical analysis results, and taking the ASTM C618 standard or its equivalent (NTC 3493) into account, showed that it was FA class F. It should be stated that the high unburned carbon content present in the FA (10.68%) exceeded the value specified in the standard specification for coal FA (6%). The same regulation stated that the use of Class F pozzolan containing up to 12.0% loss on ignition may be approved by the user if either acceptable performance records or laboratory test results were to be made available. Varying results have been reported regarding the effect of unburned carbon on FA concretes' physical, chemical and mechanical properties (Ha 2005, Pedersen 2008, Ahmaruzzaman, 2010) and it has been estimated that this value must have a maximum of 8%. The other material used in this study was silica fume (SF), which was supplied by a commercial provider.

Blended concretes were cast using FA (10%, 20% and 30%) and SF (10%) as cement replacement for evaluating mechanical strength and durability. Crushed gravel and river sand were used as coarse and fine aggregates when mixing the concrete. The coarse aggregate had 12.7 mm maximum nominal size, 2,624  $\text{kg/m}^3$  specific gravity, 1,438  $\text{kg/m}^3$  unit weight and 3.1% absorption.

En español

In English

Tabla 1. Características físicas y químicas de la ceniza volante y el cemento utilizado.

Composición química, %	Ceniza volante	Cemento
SiO <sub>2</sub>	56,86	20,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,51	4,35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,39	3,93
CaO	0,83	60,2
MgO	0,6	2,74
Na <sub>2</sub> O	0,39	0,08
K <sub>2</sub> O	1,4	0,23
Pérdidas por ignición	10,68	2,19
SO <sub>3</sub>	--	2,71
<i>Propiedades físicas:</i>	--	--
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,26	3,14
Tamaño de partícula (μm)	32,5	14,73
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	--	501,8

La arena, con densidad nominal de 2.560 kg/m<sup>3</sup>, peso unitario de 1.593 kg/m<sup>3</sup>, absorción de 1,8% y un módulo de finura de 2,62. La relación agua/material cementante se mantuvo constante (0,5); este valor se seleccionó con base en los requisitos de durabilidad expresados en la norma NSR-98, ítem C.4.2, para lo cual fue necesario incorporar un aditivo superplastificante. Las probetas fueron curadas en agua saturada con Ca(OH)<sub>2</sub> a temperatura ambiente en períodos de 28, 70, 100 y 130 días. En la tabla 2 se presentan las proporciones utilizadas en las mezclas.

Tabla 2. Proporción de materiales en las mezclas.

Denominación de la mezcla	Cemento y adición (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Agregados (kg/m <sup>3</sup> )	
			Grueso	Fino
Patrón o testigo	347	0,50	918,6	767
10% CV	C: 312,6 CV: 34,7	0,50	918,6	767
20% CV	C: 277,9 CV: 69,5	0,50	918,6	767
30% CV	C: 243,2 CV: 104,2	0,50	918,6	767
10% MS	C: 312,6 MS: 34,7	0,50	918,6	767

Para el estudio del desempeño de los concretos adicionados con CV y MS se evaluó la resistencia a la compresión según la norma ASTM C39, y se realizaron ensayos de absorción superficial inicial (*Initial Surface Absorptivity Test, ISAT*), succión capilar y permeabilidad rápida a cloruros (ASTM C1202).

### Adecuación de las cenizas volantes

La reactividad de una CV puede ser incrementada mediante activación mecánica; sin embargo, su efecto es función del equipo de molienda que se utilice (Molina, 2008). Esto permite la incorporación de porcentajes de CV más elevados para obtener mayores desempeños en la mezcla o la incorporación de pequeñas proporciones con resultados similares a los logrados con puzolanas de alta reactividad, tales como el humo de sílice (Ahmaruzzaman, 2010). En esta investigación la CV se sometió a molienda en un molino de bolas, durante un tiempo de 30 y 45 min, produciéndose una reducción del tamaño de partícula promedio. El tamaño de partícula óptimo (19.803 μm) se determinó con base en la resistencia a la compresión de morteros de cemento adicionados al 10%, cuyos resultados se incluyen en la tabla 3.

Table 1. Physical and chemical characteristics of Fly Ash and cement used

Chemical composition %	Fly ash	Cement
SiO <sub>2</sub>	56.86	20.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.51	4.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.39	3.93
CaO	0.83	60.20
MgO	0.60	2.74
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.08
K <sub>2</sub> O	1.40	0.23
Loss of ignition (LOI)	10.68	2.19
SO <sub>3</sub>	--	2.71
<i>Physical properties:</i>	--	--
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.26	3.14
Particle size (μm)	32.50	14.73
Blaine fineness (m <sup>2</sup> /kg)	--	501.8

The sand's specific gravity, absorption, unit weight and fineness modulus were 2,560 kg/m<sup>3</sup>, 1.8%, 1,593 kg/m<sup>3</sup> and 2.62, respectively. The water/cementitious material ratio remained constant (0.5); this value was based on durability requirements specified in NSR-98, item C.4.2, meaning that a superplasticizer additive had to be incorporated. The specimens were cured in Ca(OH)<sub>2</sub>-saturated water at room temperature for periods of 28, 70, 100 and 130 days. Table 2 shows the proportions used in the mixtures.

Table 2. Proportions for materials used in the concrete mixtures

Mixture name	Cement & addition (kg/m <sup>3</sup> )	A/c	Aggregates (kg/m <sup>3</sup> )	
			Coarse	Fine
Control	347	0.50	918.6	767
10% FA	C: 312.6 FA: 34.7	0.50	918.6	767
20% FA	C: 277.9 FA: 69.5	0.50	918.6	767
30% FA	C: 243.2 FA: 104.2	0.50	918.6	767
10% SF	C: 312.6 SF: 34.7	0.50	918.6	767

Concrete samples were tested to determine their compressive strength, following ASTM C39 standard procedure. Durability tests such as initial surface absorption (ISAT), water absorption rate and rapid chloride permeability were determined in accordance with BS 1881, ASTM C1585, ASTM C1202 standard procedures, respectively.

### Mechanical treatment of fly ash

FA reactivity can be increased by mechanical activation, but its effect depends on the milling equipment used (Molina, 2008). This allows incorporating higher percentages of FA for greater concrete mixture performance or adding small proportions with similar results to that obtained with highly reactive pozzolans, such as silica fume (SF) (Ahmaruzzaman, 2010). FA was subject to milling in a ball mill for 30 and 45 min in this study, resulting in reduced average particle size. Optimum particle size (19.8 μm) was determined on the compressive strength of cement mortars having 10% FA; results are given in Table 3.

En español

In English

En la figura 1 se presenta la distribución de tamaño de partícula de la CV seleccionada para la elaboración de los concretos adicionados, determinada por medio de la técnica de granulometría láser, utilizando un equipo Mastersizer 2000.

Figure 1 shows the particle size distribution of the FA selected for mortar preparation determined by laser particle size technique using Mastersizer 2000 equipment.

Tabla 3. Resistencia a compresión de morteros con CV molida, a 7 días de curado.

Table 3. Blended cement mortar compressive strength after 7 days curing

Tamaño promedio de partícula	Resistencia a compresión (MPa)
32,498 $\mu\text{m}$ (CV sin moler)	7,92
23.205 $\mu\text{m}$ (30 min de molienda)	15,58
19.803 $\mu\text{m}$ (45 min de molienda)	17,18

Average particle size	Compressive strength (MPa)
32.498 $\mu\text{m}$ (unmilled FA)	7.92
23.205 $\mu\text{m}$ (after 30 min grinding)	15.58
19.803 $\mu\text{m}$ (after 45 min grinding)	17.18

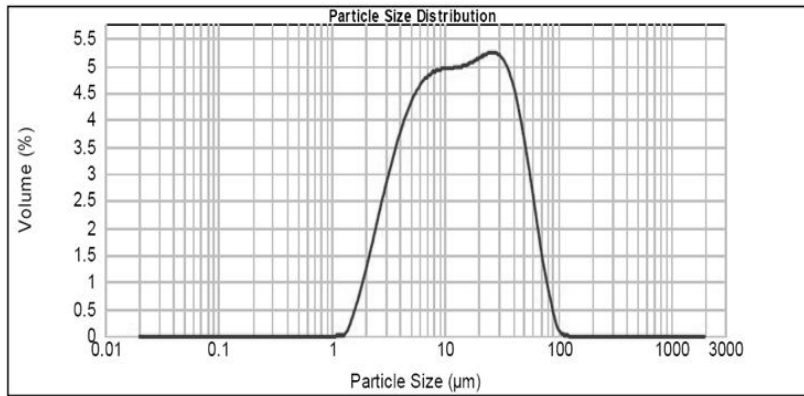


Figura 1. Distribución del tamaño de partícula de la ceniza volante molida.

Figure 1. Fly ash particle size distribution after 45 min grinding.

## Resultados y discusión

## Results and Discussion

### Resistencia a compresión

### Compressive strength

Este ensayo se llevó a cabo según la norma ASTM C39, en cilindros de 10 x 20 cm; los resultados correspondientes se presentan en la figura 2. Se observa, en general, para las probetas adicionadas, independiente del tipo o porcentaje de adición, que la resistencia incrementa con la edad de curado, (Bouzoubaa, 2002; López, 2003; Santaella, 2004); sin embargo, a edades tempranas (28 días) las probetas adicionadas con CV presentan una resistencia inferior a la muestra patrón (0% de adición), indicando baja reactividad. A un tiempo de curado de 130 días la muestra del 10% de CV ofrece un incremento de resistencia del orden del 12,3% respecto a la referencia, resultado que coincide con los obtenidos por Molina (2008) y Santaella (2004). Un incremento en el porcentaje de adición de CV en órdenes hasta del 30% de CV genera una pérdida de resistencia notable (Yilmaz y Olgun, 2008). Este comportamiento está directamente relacionado con la calidad y reactividad de la adición y el avance en el desarrollo de los productos de hidratación (Papadakis, 1999; Sahmaran, 2009; López García, 2003). Por el contrario, las probetas adicionadas con MS muestran un desempeño resistente respecto del patrón superior en un orden del 6%, comportamiento que coincide con el descrito por López García (2003).

The compressive strength test was conducted according to ASTM C39, using 10X20cm cylinders; the results are presented in Figure 2. It was observed that strength increased with curing age for the specimens, regardless of addition type or proportion (Bouzoubaa 2002, Lopez 2003, Santaella 2004). FA specimens showed resistance less than that for the control sample (0% addition) at an early age (28 days), indicating low reactivity. The 10% FA sample had 12.3% increase in strength compared to reference sample with 130 day curing time, such result being consistent with that reported by Molina (2008) and Santaella (2004). Increased FA percentage (adding up to 30% FA) produced a significant loss of strength (Yilmaz and Olgun, 2008). This behaviour was directly related to the quality and reactivity of the additive and progress in hydration product development (Papadakis 1999, Sahmaran 2009, López García 2003). On the contrary, the specimen with SF had 6% higher compressive strength than the reference mortar, matching the behaviour described by Lopez Garcia (2003).

En español

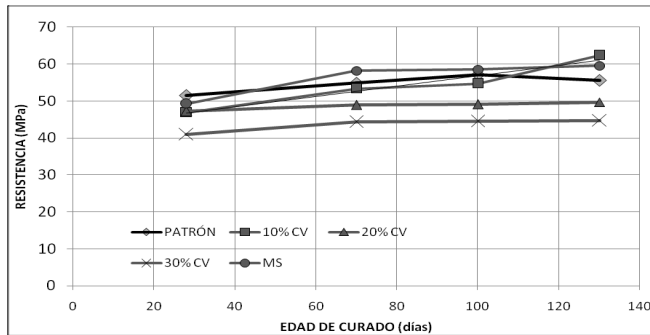


Figura 2. Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

## Ensayos de durabilidad

### Ensayo ISAT

El ensayo ISAT se desarrolló aplicando la norma británica BS3 1881 parte 208, y los resultados correspondientes se presentan en la figura 3. Según la gráfica, las mezclas adicionadas con CV tienen un comportamiento que está sujeto al porcentaje de reemplazo, es decir, entre mayor sea éste (30% de CV) la muestra es más permeable, resultados que coinciden con Chindaprasirt y Rukzon (2008) y están directamente relacionados con la menor resistencia mecánica de este tipo de concretos. No obstante, a medida que aumenta la edad de curado y para los tiempos medidos en el ensayo, la diferencia en la absorción superficial inicial de las mezclas de CV con relación a la muestra patrón disminuye, en especial para un tiempo de 60 min y un curado de 100 días, siendo esta diferencia del orden del 20 y 33% para las probetas adicionadas con el 10 y 20% de CV, respectivamente. Adicionalmente, se identifica que existe un aumento de absorción superficial marcada al pasar del 20 al 30% de CV, situación que no se presenta entre las mezclas adicionadas en un 10 y 20%.

La muestra que presentó la menor absorción superficial inicial para todas las edades de curado fue la de mezcla sin adición (patrón), resultados que coinciden con Arango (2003) y Nokken (2004). Para esta misma edad y tiempo de ensayo se observa que la diferencia de absorción entre MS y 10% de CV es baja, del orden de 6,6%, lo cual refleja que a edades tardías la CV contribuye a disminuir la absorción superficial. Estos resultados concuerdan con los de resistencia a la compresión para 10% de CV a edades largas. Según Ramachandran (2001), se considera que un concreto tiene permeabilidad alta cuando la absorción superficial es mayor a 0,20 (ml/m<sup>2</sup>s); media, en el rango 0,15-0,07 (ml/m<sup>2</sup>s); y baja, si es menor de 0,07 (ml/m<sup>2</sup>s), para 60 min de ensayo. Con base en los valores promedios de absorción reportados para cada muestra, se puede concluir que en general todas tienen un buen comportamiento, clasificando las probetas de 30% de CV dentro de una permeabilidad media y las mezclas restantes dentro de una permeabilidad baja.

In English

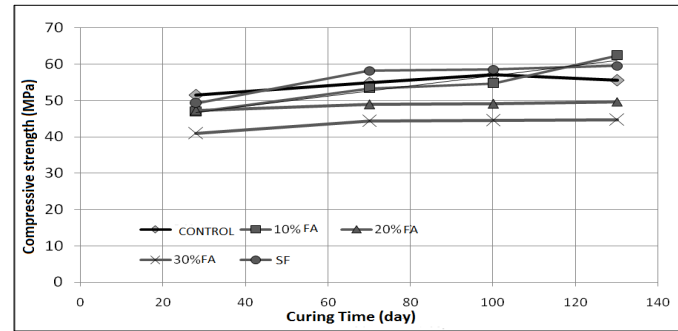


Figure 2. Compressive strength test results

## Durability tests

### Initial surface absorption test (ISAT)

The ISAT test was carried out in line with BS3 British Standard 1881 part 208; the results are presented in Figure 3. According to the graph, concretes having added FA showed behaviour related to replacement ratio. The 30% FA concrete was more permeable (Rukzon and Chindaprasirt, 2008); this result was directly related to its lower mechanical strength. However, increasing curing age and times measured in the test led to a decreased difference in initial FA concrete surface absorption compared to control sample, especially for 60 minute and 100 day curing times, the difference being about 20% and 33% for specimens at 10% and 20% FA, respectively. This also showed that there was a marked increase in FA surface absorption (20% to 30%), a situation which did not occur in specimens containing 10% and 20% FA.

The specimen without addition (control) had the lowest initial surface absorption for all curing ages, thereby agreeing with previous studies (Arango 2003, Nokken 2004). The difference in absorption between SF and 10% FA was low for the same age and testing time (around 6.6%), reflecting that FA helped reduce surface absorption later on. These results were consistent with 10% FA compressive strength for long curing times. According to Ramachandran (2001), it is considered that concrete has high permeability when surface absorption is greater than 0.20 (ml/m<sup>2</sup>s), medium in the 0.15 to 0.07 (ml/m<sup>2</sup>s) range and low if less than 0.07 (ml/m<sup>2</sup>s) for 60 minutes' testing. Based on the average absorption values reported for each sample, all concretes had good performance, the 30% FA specimen had medium permeability and the remaining mixtures low permeability.

En español

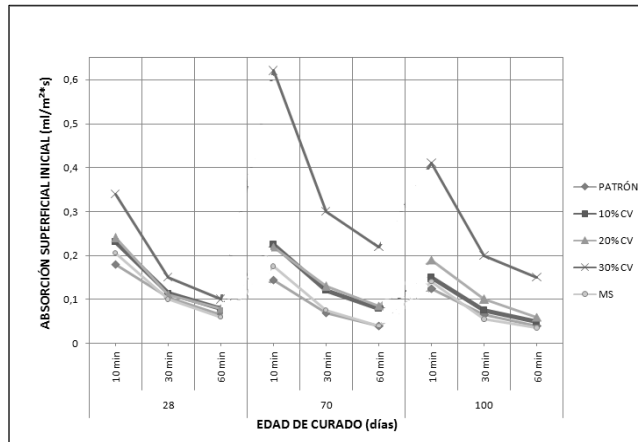


Figura 3. Tasa de absorción superficial inicial.

**Ensayo de succión capilar (sortividad)**

Este ensayo se desarrolló según la norma ASTM C1585, en cilindros de 7,5 x 15 cm a edades de curado de 28 y 100 días. Con los datos que se obtienen, se calcula el coeficiente de absorción capilar (K) presentado en la figura 4, destacándose un mejor comportamiento al incorporar a la mezcla un 30% de CV, lo cual puede atribuirse a un mayor taponamiento de poros capilares en el material como consecuencia de la mayor densificación (Ahmaruzzaman, 2010); sin embargo, los resultados no difieren en más del 3% en comparación con la mezcla patrón. De igual forma, se identifica que al aumentar el tiempo de curado disminuye la permeabilidad capilar para las mezclas que incorporaron esta adición, comportamiento que coincide con los reportados por otros investigadores (Nokken, 2004; Schwarz, 2008; Gopalán, 1996). Las muestras adicionadas con MS presentan el menor coeficiente de absorción capilar, lo cual se atribuye a la alta finura del humo de sílice y su reactividad, lo que genera una aceleración en la reacción puzolánica y la disminución en el tamaño de poros capilares en el concreto (ACI 2000). En términos generales, con los resultados obtenidos en la medida de esta propiedad, se evidencia el efecto positivo, para este caso, de las dos adiciones evaluadas.

In English

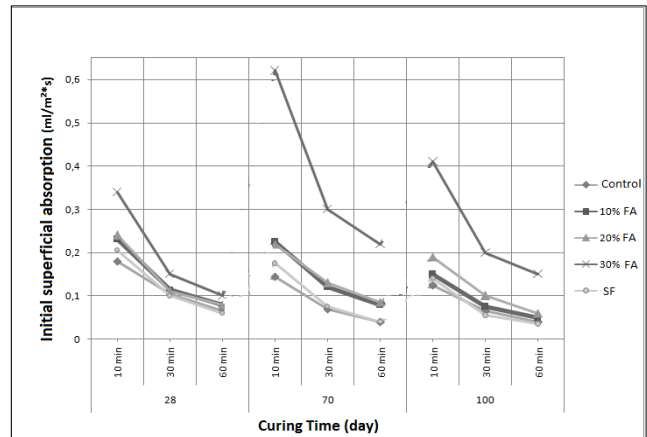


Figure 3. Initial surface absorption rate

**Water absorption rate (sorptivity)**

This test was conducted in line with ASTM C1585, using 7.5 cm diameter and 15 cm height cylindrical concrete specimens after 28 and 100 days curing. The capillary absorption coefficient (K) was calculated from data obtained in the test; the results are presented in Figure 4. The best performance was presented in 30% additive concrete which could be attributed to increased clogging of capillary pores in the material as a result of higher density (Ahmaruzzaman, 2010); however, the results differed by no more than 3% compared to concrete without addition. It was seen that increasing curing time decreased capillary permeability for mixtures incorporating FA, such pattern matching that reported by other researchers (Nokken 2004, Schwarz 2008, Gopalan 1996). The specimens with SF had the lowest capillary absorption coefficient, being attributed to high silica fume fineness and its early reactivity, leading to accelerated pozzolanic reaction and decreased capillary pore size in the concrete (ACI 2000). Overall, the results obtained from measuring this property demonstrated the positive effect of the two additions being evaluated.

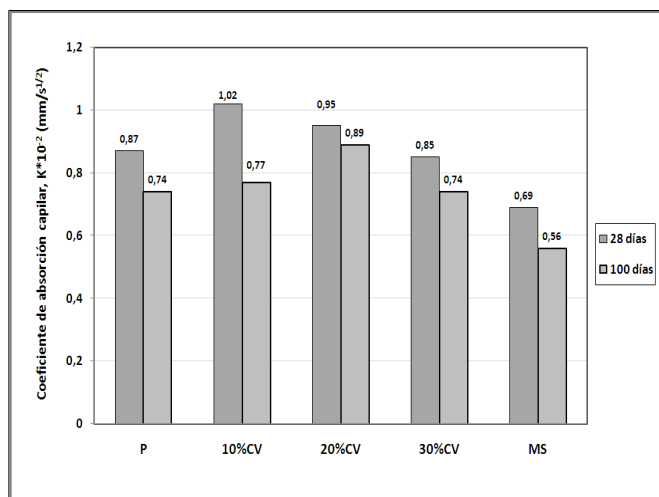


Figura 4. Coeficiente de absorción capilar.

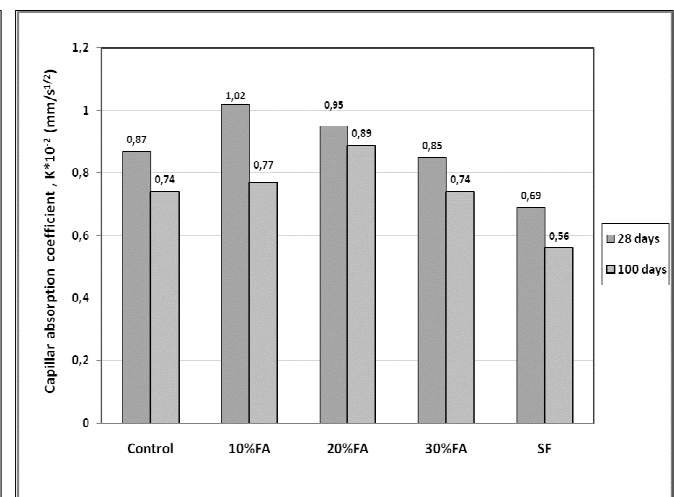


Figure 4. Capillary absorption coefficient

### Ensayo de permeabilidad al ion cloruro

Esta técnica se llevó a cabo según la norma ASTM C1202, en muestras de tamaño 10 x 5 cm, para edades de curado de 28, 70 y 100 días. En la figura 5 se aprecia que para las edades de curado evaluadas, las muestras adicionadas con 10% de MS y 30% de CV presentan mayor resistencia a la penetración de cloruros. Para la edad de 100 días se identifica que todas las mezclas con adición clasifican dentro de un comportamiento moderado, según la norma ASTM-C1202, aunque los resultados registrados para las probetas con humo de sílice y 30% de CV están más cercanas a 2.000 coulombios, valor límite entre el rango bajo y moderado en la norma. Es de anotar que el valor reportado por las probetas con adición de 30% de CV fue 18% mayor que las probetas adicionadas con MS, mostrando así el efecto positivo del incremento en el porcentaje de adición de CV; este efecto puede ser atribuido, además de la reacción pozoalónica, a la mayor capacidad de enlace por los cloruros (Dhir, 1999; Cheewaket, 2010); resultados que coinciden con los de Molina (2008) y Sahmaran (2009).

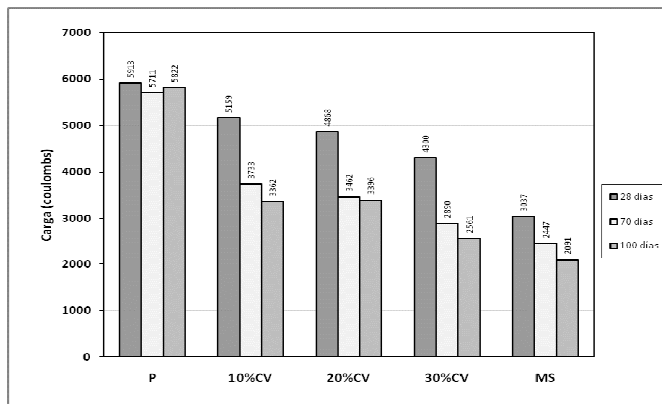


Figura 5. Resultados del ensayo de permeabilidad rápida a cloruros.

### Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que: Las CV utilizadas para el estudio clasifican como tipo F; no obstante, presentan un contenido de inquemados superior al 10%, a lo cual se le puede atribuir el regular desempeño observado en el presente estudio en algunas de las propiedades evaluadas.

El porcentaje óptimo de adición de CV es del 10% desde el punto de vista mecánico, sin embargo incrementos en el porcentaje dan lugar a efectos positivos en las propiedades de absorción capilar y permeabilidad a cloruros.

En comparación con el humo de sílice, las CV mostraron un desempeño inferior para todas las propiedades evaluadas, a excepción del desempeño frente a cloruros, donde se obtuvieron resultados comparables para el 30% de cenizas volantes.

En futuros trabajos se recomienda realizar mezclas de concretos adicionadas con cenizas volantes en porcentajes superiores al 30%, y evaluar las propiedades de desempeño mecánico y durable; de tal manera que se analicen tanto el beneficio como los inconvenientes que traería la inclusión de este residuo en materiales de construcción. Así mismo, se considera importante probar métodos de reducción del nivel de inquemados, tales como procesos de flotación, para mejorar la calidad de la ceniza volante.

### Resistance to chloride ion penetration

This technique was carried out according to ASTM C1202, using 10 cm diameter and 5 cm height cylindrical specimens after 28, 70 and 100 days curing. Figure 5 shows that concrete specimens having 10% added SF and 30% FA had greater resistance to chloride ion penetration for the curing ages tested here. It was seen that by 100 days all specimens classified as having moderate behaviour, according to ASTM C1202 (but results recorded for samples having 10% SF and 30% FA were closer to 2,000 coulombs) had limited values between the low and moderate range in standard specification. It should be noted that the value reported for the samples with 30% added FA was 18% higher than specimens with SF, demonstrating the positive effect of increased FA addition percentage. This effect could be attributed (in addition to the pozzolanic reaction) to higher chloride binding ability (Dhir 1999, Cheewaket 2010). These results were consistent with those of Molina (2008) and Sahmaran (2009).

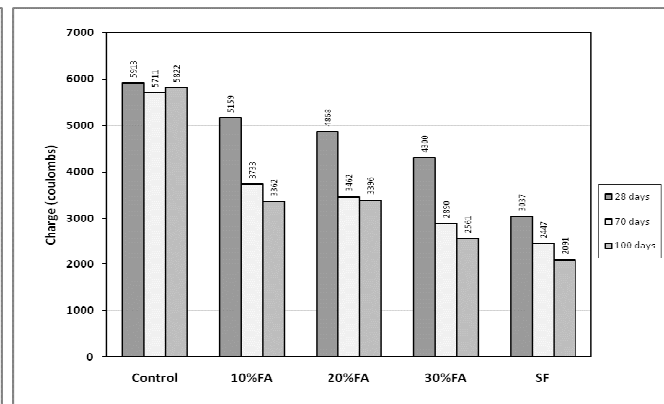


Figure 5. Rapid chloride permeability test results

### Conclusions

The results led to concluding that:

The FA used in the study was classified as class F, but there was still greater than 10% unburned content, explaining the poor performance observed in this study in some of the properties being evaluated;

Optimum FA addition rate was 10% from a mechanical point of view, although there was increased positive effect percentage regarding capillary absorption and chloride permeability;

Compared to silica fume, FA had lower performance for all properties tested, except chloride penetration resistance; comparable results of 10% SF to 30% FA were obtained in this test; and

Future studies should evaluate the mechanical strength and durability of concrete mixtures having additive percentages above 30% FA, so as to analyse both the benefits and drawbacks of using this by-product. Test methods for reducing the level of unburned carbon, such as flotation, should also be considered to improve FA quality.

## Referencias / References

- Alhozaimy, A., Soroushian, P., Mirza, F., Effects of curing conditions and age on chloride permeability of Fly Ash mortar., *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 1, 1996, pp. 85-87.
- Ahmaruzzaman M., A review on the utilization of fly ash., *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, 2010, pp. 327-363.
- Ampadu, K., Torii, K., Chloride ingress and steel corrosion in cement mortars incorporating low-quality Fly Ashes., *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp.893-901.
- Arango, O. J., Valoración de la Permeabilidad al Agua en Concretos con diferentes Características., tesis presentada a la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, para optar al grado de Magíster en Estructuras, 2003.
- American Concrete Institute., *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.*, ACI 234R-96, 2000, 51 p.
- ASTM, International., *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*, 2008, 3 p, (ASTM C618).
- ASTM, International., *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.*, 1999, (ASTM C39).
- ASTM, International. *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.* 2004. (ASTM C1585).
- ASTM, International. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.* 1997. (ASTM C1202).
- Bouzoubaa, N., Fournier, B., Malhotra, M., Golden, D., Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume Fly Ash blended cement produced in Cement Plant., *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 6, 2002, pp. 1993-1402.
- Canals Alvarez, L., Estudio de la Aplicabilidad de las Cenizas Volantes de la Planta Térmica de Mudunuro (India), en materiales de construcción., *Universidad Politécnica de Catalunya*, 2007, 92 p.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment., *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 1352-1357.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar., *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 1601-1606.
- Dhir, R.K., Jones, M.R., Development of chloride-resisting concrete using fly ash., *Fuel*, Vol. 78, 1999, pp. 137-42.
- Gopalan, M. K., Sorptivity of fly ash concretes., *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, 1996, pp. 1189-1197.
- Ha, T.H., Muralidharan, S., Bae, J.H., Ha, Y.Ch., Lee, H.G., Park, K.W., Kim, D.K., Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar., *Construction and Building Materials*, Vol. 19, 2005, pp. 509-515
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., *Concretos: Durabilidad de Estructuras de Concreto.*, Bogotá: ICONTEC, 2004. 23 p. (NTC 947-1).
- Jian, L., Lin, B., Cai, Y., Studies on hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders., *ACI Materials Journal*, . Vol. 96, No. 6, 1999, pp 703-706.
- López García, V., Estudio de los Efectos de algunos Materiales Componentes en las Propiedades Mecánicas del Hormigón de Altas Prestaciones desde Edades Tempranas., tesis presentada a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, para optar al grado de Doctor, 2003.
- Lorenzo García, M. P., Influencia de dos tipos de Cenizas Volantes Españolas en la Microestructura y Durabilidad de la pasta de Cemento Portland Hidratado., *Instituto Eduardo Torroja CSIC, Madrid (España)*, 1993.
- Mehta, P.K., Pozzolanic and cementitious by products in concrete -Another look., *Proceedings of Third CANMENT/ACI Int. Conf.*, V:M. Malhotra. Michigan, ACI SP 114 : American Concrete Institute, SP-79, Vol. 1., 1989. pp 1-43.
- Molina, O., La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del Cemento Pórtland en la durabilidad del Hormigón., tesis presentada a la Universidad Politécnica de Madrid, para optar el grado de Doctor, 2008.
- Naik, T., Singh, Sh., Ramme, B., Mechanical properties and durability of Concrete made with blended Fly Ash., *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, pp. 454-469.
- Nokken, M. R., Development of Capillary Discontinuity in Concrete and its Influence on Durability., *University of Toronto, Quebec, Canada, Department of Building. Civil & Environmental Engineering*, 2004, 332 p.
- Papadakis, V.G., Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems Part I. Low Calcium Fly Ash., *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 11, 1999, pp. 1727-1736.
- Pedersen, K.H., Jensen, A.D., Skjøth-Rasmussen, M.S., Dam-Johansen, K., A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete., *Prog Energy Combust Sci.*, Vol. 34, 2008, pp. 135-54.
- Raghu, B.K., Hamid Eskandari, B.V., Venkatarama Reddy, B.V., Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN., *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 117-128.
- Ramachandran, V.S., Beaudoin, J., *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology.*, N.Y: William Andrew Publishing, 2001. p 694.
- Sahmaran, M., Yaman, I., Tokyay, M., Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash., *Cement and concrete composites*, Vol. 31, Issue 2, 2009, pp. 99-106.
- Santaella Valencia, L. E., Salamanca Correa, R., Comportamiento del Concreto con Bajos porcentajes de Ceniza Volante (Termopaipa IV) y agua constante., *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, No. 14, 2004, pp. 14-19.
- Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N., Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash., *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 6, 2008, pp. 486-496.
- Yilmaz, B., Olgun, A., Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone., *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, 2008, pp. 194 - 201.