

LA INFLUENCIA DEL CEMENTO PORTLAND EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, PERMEABILIDAD Y ESTRUCTURA POROSA DE LOS HORMIGONES CON CENIZAS VOLANTES¹

O. I. Molina Bas², A. Moragues Terrades³ y J. C. Gálvez Ruiz⁴

Resumen: Limitar la capacidad de transporte a través del hormigón es fundamental para mejorar la durabilidad del material resultante. El uso de cenizas volantes como adición del hormigón está ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios micro-estructurales motivados por la adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro. No obstante, los efectos de los cambios de composición y micro-estructura en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material no están completamente claros. En este trabajo se ha estudiado el uso de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento. Se emplearon dos cementos Pórtland Tipo 1 (CEM I). El primero alcanza la clase resistente por finura de molido y el segundo por su composición. Los hormigones obtenidos se han caracterizado mecánicamente y se ha estudiado su estructura porosa mediante porosimetría de intrusión de mercurio y su respuesta frente a los gradientes hidráulicos. El trabajo realizado permite mejorar el conocimiento del efecto de las cenizas en la distribución porosa y la influencia de la misma en el comportamiento mecánico del material.

Palabras claves: cemento, composición, estructura porosa, finura de molido, permeabilidad.

INFLUENCE OF PORTLAND CEMENT IN THE MECHANICAL PROPERTIES, PERMEABILITY AND PORE STRUCTURE OF CONCRETES MIXED WITH FLY ASH

Abstract: Limitation of transport capacity through the concrete is one of the basic points in the improvement of the material's durability. The use of fly ash as an addition to concrete is widely extended; a general consensus has been established due to the pore size reduction produced by the ashes. Nevertheless, the effects of micro-structural and composition changes on the mechanical and durability properties are not well defined. In the present study the use of fly ash has been considered as substitute of cement. Two Type 1 (CEM I) Portland cements (CEM I) have been used. The first one reaches its level of strength due to particle fineness and the second one due to its composition. The concrete mechanical properties and its porous structure were evaluated. The study includes porosimetry and water permeability tests. This work improves the knowledge of the fly ash concrete hydration process, of the fly ash influence on the porous distribution and the effects of the latter on the mechanical and durability properties of the material.

Keywords: cement, composition, fineness, permeability, pore structure.

¹ Artículo recibido 19 de enero de 2009 y aceptado el 13 de mayo de 2009.

² Catedrático Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, P.O. Box 9000 Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. E-mail: omolina@uprm.edu

³ Profesora Titular, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I, de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España. E-mail: amoragues@caminos.upm.es

⁴ Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I, de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España. E-mail: jcgalves@caminos.upm.es

INTRODUCCIÓN

La durabilidad del hormigón armado es determinante en la sostenibilidad de las infraestructuras de obra civil. El empleo de adiciones como las cenizas volantes pueden contribuir al refinamiento de la estructura porosa del hormigón. Asimismo, las cenizas volantes ofrecen una contribución positiva como sustituto parcial del cemento Pórtland. La reducción de la cantidad de cemento empleado en las mezclas de hormigón disminuye los costes del material, reduce la contaminación asociada a la producción de cemento y ayuda a solucionar el problema de eliminación de las cenizas.

Desde un punto de vista económico, la vida útil de las infraestructuras se encuentra limitada por el deterioro de los materiales de construcción. En el año 2002, EE.UU. estimó que los costes de corrosión en sus infraestructuras ascienden a los 22.6 mil millones de dólares anuales (Koch et al., 2002) y se prevé que esa cantidad aumente a razón de \$500 millones anuales (Smith y Virmani, 2000).

El Comité Euro-International du Béton (Comité Euro-International du Béton, 1992) (CEB por sus siglas en francés) señala que la mayoría de los procesos químicos y físicos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, están condicionados por el transporte a través de los poros y las grietas. La estructura de poros se puede clasificar por su tamaño y distribución. Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) los poros se clasifican en: micro-poros ($\varnothing < 2$ nm), meso-poros ($2 \text{ nm} < \varnothing < 50$ nm) y macro-poros ($\varnothing > 50$ nm). Los que suelen afectar a la durabilidad son los meso-poros y los macro-poros, especialmente en el caso de poros interconectados y porosidad abierta, lo que facilita el transporte de sustancias solubles en líquidos o gases.

En los hormigones con adición de cenizas volantes ocurren dos reacciones principales. En la primera se produce gel C-S-H ($C_3S_2H_4$) y Portlandita (hidróxido cálcico) por la hidratación del cemento Pórtland, ecuación (1). En la segunda, la Portlandita se combina con las cenizas volantes (CV) para formar nuevos geles de C-S-H, ecuación (2). El resultado suele ser un hormigón con mejores propiedades físicas, resistencia más alta, y mayor densidad. Algunos autores (Naik et al., 1994; Pihlajavaara y Paroll, 1975) indican que las cenizas volantes disminuyen la permeabilidad del hormigón.



La variedad de composición química y propiedades físicas de las cenizas volantes hace difícil predecir de forma general la modificación de las características del hormigón. Por esta razón el Instituto Americano del Hormigón (ACI Committee 232, 2002) recomienda el análisis de las cenizas volantes y la realización de ensayos de caracterización del hormigón con adición de cenizas.

El objetivo del presente trabajo de investigación es estudiar la influencia de las propiedades del cemento Portland (Tipo 1) en la durabilidad del hormigón con cenizas volantes, dentro de los límites de cantidad de ceniza admitidos por la normativa española. Para lograr estos objetivos se realizan ensayos de caracterización mecánica (resistencia a compresión, módulo de elasticidad y tracción indirecta), así como ensayos de penetración de agua a presión (UNE-EN 12390-8) y porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés).

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Materiales empleados

La Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-98) especifica que los hormigones con adición de cenizas volantes tienen que fabricarse exclusivamente con cemento CEM I. En este trabajo se ha adoptado cemento CEM I 42.5 R. Se han seleccionado dos cementos: el primero alcanza la clase resistente por finura de molido, se la denominará *F*, y el segundo por su composición, a la que le denominará *G*. La Tabla 1 muestra mineralogía inferida teóricamente por medio del método de Bogue (UNE 80304, 2006).

Tabla 1: Composición mineralógica de los cements.

Componente	Holcim (F)	Cemex (G)
C ₃ S	56.06	65.13
C ₂ S	17.56	5.84
C ₃ A	9.84	12.12
C ₄ AF	7.51	8.24

La Figura 1 muestra los resultados de los análisis granulométricos de los cementos. La distribución de tamaño de partículas se determinó mediante difracción láser en suspensión (vía líquida), de acuerdo a ISO 13320-1 (1999).

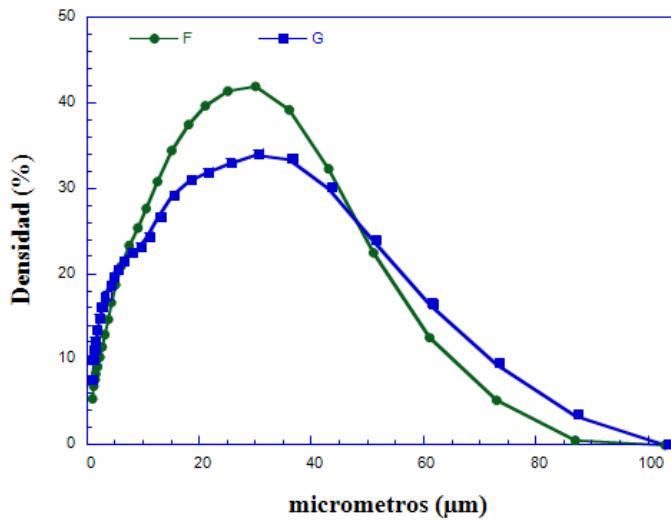


Figura 1: Análisis granulométrico de los cements.

Los áridos empleados en las amasadas son de naturaleza silícea y de la misma fuente de procedencia. Los gruesos, con un diámetro máximo de 20 mm, proceden de machaqueo y su módulo granulométrico es de 7.08. El módulo granulométrico de las arenas utilizadas es de 2.86. El análisis granulométrico de los áridos se realizó conforme a la norma UNE-EN 933-1 (1998).

Las cenizas volantes empleadas son de naturaleza silícea y de bajo contenido en óxido de calcio, clasificadas como tipo V de acuerdo a la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-03). Además cumplen con las especificaciones de UNE EN 450, para su empleo como adición al hormigón. Proceden de la central térmica de Andorra (Teruel, España). En la Tabla 2 se presenta la composición química de las cenizas volantes utilizadas.

Tabla 2: Composición química de las cenizas volantes.

Compuesto	Cenizas	Norma
Al ₂ O ₃	30.02	UNE 80230
Fe ₂ O ₃	19.93	UNE 80230
CaO	8.09	UNE 80230
SiO ₂	40.56	UNE 196-2

La Figura 2 muestra el resultado del análisis granulométrico de las cenizas volantes. La distribución de tamaño de partículas se determinó mediante difracción láser en suspensión (vía líquida), de acuerdo a ISO 13320-1 (1999).

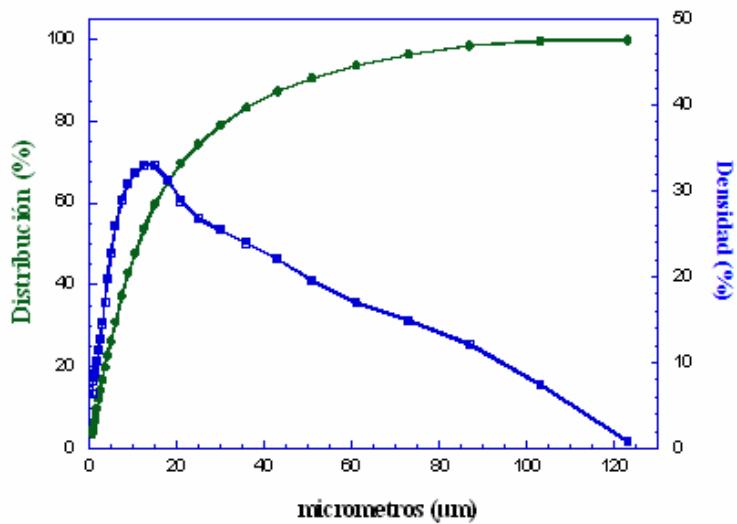


Figura 2: Análisis granulométrico de las cenizas volantes.

Dosificaciones

La dosificación de los áridos se realizó por el método de Bolomey. Se empleó 350 kg de cemento por m^3 de hormigón y una relación agua/cemento de 0.65. En las dosificaciones del hormigón con adición de cenizas volantes se siguieron las recomendaciones de la norma UNE 83414 de 1990. Además, siguiendo la EHE-98 (art. 37.3.2), *Limitaciones a los contenidos de agua y de cemento para cementos con adiciones*, el contenido de cemento, c , es sustituido por $c + KF$, donde K es el coeficiente de eficacia de las cenizas volantes, y F el contenido de la adición. Así la relación de agua / cemento (a/c) es sustituida por $a/(c + KF)$.

La Tabla 3 presenta las cantidades empleadas de cada material en las dosificaciones. Como coeficiente de eficacia de las cenizas se ha adoptado $K = 0.30$.

Tabla 3: Dosificación por m^3 de hormigón.

Ceniza / Cemento	Cemento(kg)	Cenizas(kg)	Arena(kg)	Grava(kg)
0.00	350.0	0.0	918.0	780.0
0.15	334.9	52.2	878.5	780.0
0.35	316.7	110.9	830.6	780.0

Fabricación de las probetas

El hormigón se amasó en una amasadora planetaria de eje vertical de 100 litros de capacidad. Las probetas se elaboraron en amasadas de 95 litros, obteniéndose de cada amasada 16 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. El proceso de amasado y curado siguió las recomendaciones de ASTM C 192.

Ensayos realizados

La Tabla 4 enumera los ensayos realizados y las edades seleccionadas para su realización, así como la normativa seguida para su realización.

Tabla 4: Ensayos realizados.

Ensayo	Tiempo (días)			Normas UNE
	7	28	91	
Compresión	X	X	X	83304
Tracción indirecta	X	X	X	83306
Módulo de elasticidad	X	X	X	83316
Penetración de agua	--	--	X	12390-8
Porosimetría	--	--	X	----

La porosidad de las muestras se ha medido con un porosímetro de intrusión de mercurio. La técnica empleada en los ensayos es similar a las directrices de la norma ASTM D4404-84 (2004). En este estudio se empleó un porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que opera hasta una presión de 33,000 psi (228 MPa) cubriendo un rango de diámetro de poro desde 0.006 a 175 μm .

La obtención de la muestra siguió un proceso en el que se extrae un fragmento de hormigón del interior de probeta, a 5 cm de los extremos. Mediante tenazas de corte se extrajeron los áridos gruesos más visibles y se separan con aire a presión los restos de áridos finos y el polvo superficial que se desprenden de la matriz. El resultado es una masa redondeada de “mortero” de $3.5g \pm 3g$. El acondicionamiento de la muestra se siguió un proceso de precalentamiento y desgasificación en el que la muestra se secó a una temperatura de 40°C hasta peso constante $\pm 0.1\%$ de variación en masa, durante 24 horas. Posteriormente se desgasificó la muestra con una bomba de vacío de 40 KPa durante 30 minutos.

Concluido en acondicionamiento de la muestra se coloca la misma en el penetrómetro. La intrusión de mercurio fue gradual y es tiempo de estabilización para cada condición de presión fue de 10 segundos, el ángulo de contacto usado para los cálculos numéricos es de 130 grados.

RESULTADOS

Resistencia a compresión

La Figura 3 muestra los resultados de resistencia a compresión para cada dosificación y cemento empleados. Los valores presentados corresponden al valor medio de tres probetas ensayadas.

Las amasadas con cemento *F* proporcionan, a igualdad de condiciones, mayor resistencia a compresión que las amasadas con cemento *G*. Estas diferencias se presentan a todas las edades, para cada proporción de cenizas / cemento. Además, se observa que la incorporación de cenizas en un 15% y un 35% no varía significativamente la resistencia para un mismo tipo de cemento.

Al mismo tiempo, se observa que los hormigones con sustitución parcial de cemento por cenizas volantes superan la resistencia del hormigón sin ceniza (blanco o referencia) a partir de los 28 días, y en especial a los 91 días. Sin embargo, a los 7 días la resistencia de los hormigones con cenizas apenas mejora respecto al blanco (variación inferior al 5 %).

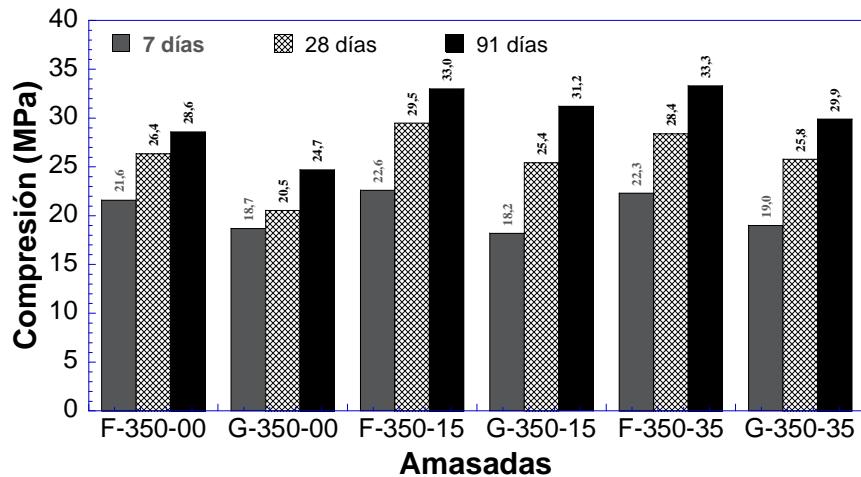


Figura 3: Resistencia a compresión.

Resistencia a tracción indirecta

La Figura 4 muestra los resultados de resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) para cada dosificación y cemento empleados. Los valores presentados corresponden al valor medio de tres probetas ensayadas.

Las amasadas con cemento *F* proporcionan, a igualdad de condiciones, mayor resistencia a tracción que las amasadas con cemento *G*. Estas diferencias se presentan en todas las edades, para cada proporción de ceniza / cemento. Además, se observa que la incorporación de cenizas en un 15% y un 35%, para un coeficiente de eficacia de 30%, no varía significativamente la resistencia para un mismo cemento.

En el caso de los hormigones amasados con cemento *F* la adición de cenizas no modifica sustancialmente el comportamiento, la diferencia a los 91 días es tan solo de 0.1 MPa, mientras que en los hormigones con cemento *G* la mejora fue superior para las mismas condiciones. En la resistencia a tracción la diferencia entre los dos cementos utilizados es más significativa que la aportada por la adición. Así, los hormigones fabricados con el cemento *F* y sin cenizas presentaron valores resistentes iguales o superiores que cualquiera de las combinaciones realizadas con cemento *G*.

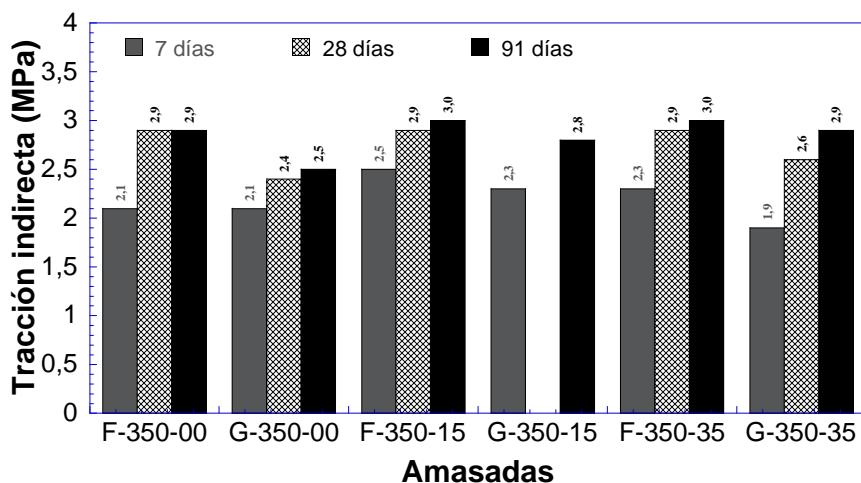


Figura 4: Resistencia a tracción indirecta.

Módulo de elasticidad a compresión

La Figura 5 muestra los resultados de los módulos de elasticidad para cada dosificación y cemento empleados. Los valores presentados corresponden al valor medio de tres probetas ensayadas.

En los valores medidos a 91 días, se puede observar que los hormigones con cemento *G* muestran un módulo de elasticidad mayor que los que se hicieron con cemento *F*.

Los hormigones con cenizas volantes presentan valores de módulo de elasticidad mayores que los hormigones sin cenizas a partir de los 28 días, independientemente del cemento utilizado, para cenizas volantes con un coeficiente de eficacia de 30%.

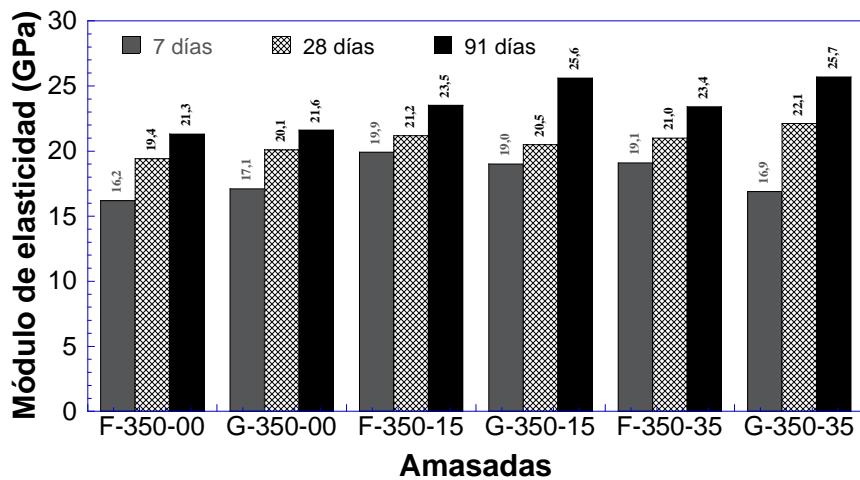


Figura 5: Módulo de elasticidad a compresión.

Permeabilidad al agua y porosimetría por intrusión de mercurio

La Figura 6 muestra los resultados de penetración de agua bajo presión y diámetro medio de poros para cada dosificación y cemento empleados, a los 91 días de curado. Los valores presentados corresponden al valor medio de tres probetas ensayadas.

Los hormigones sin adición de cenizas no muestran diferencia aparente entre ellos por lo que se refiere a penetración de agua y tamaño medio de poro. Los resultados muestran que la permeabilidad y el diámetro medio de poro se reducen con la adición de cenizas volantes.

Los hormigones fabricados con cementos *G* presentan una menor permeabilidad que los hormigones fabricados con el cemento *F*. Este aspecto es confirmado por el menor diámetro medio de los poros, como muestran los resultados del ensayo por intrusión de mercurio.

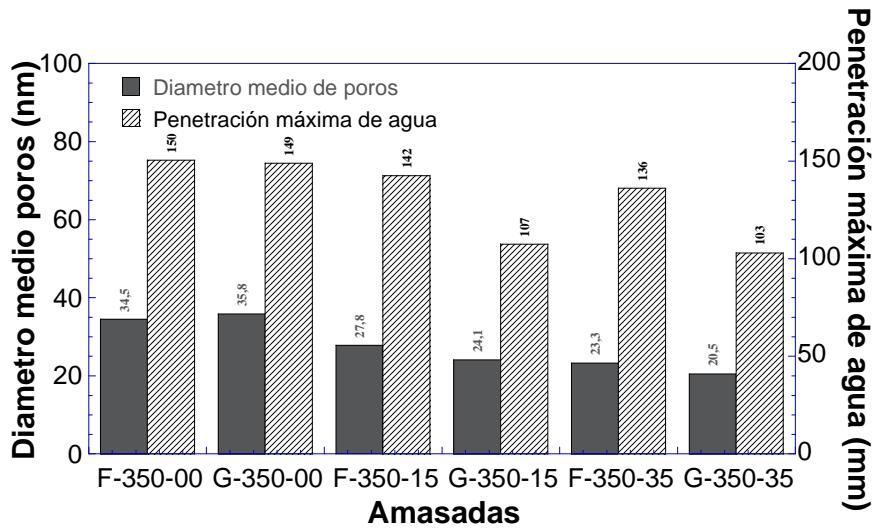


Figura 6: Permeabilidad al agua y diámetro de poros por intrusión de mercurio a los 91 días de curado.

La Figura 7 presenta la resistencia a compresión y la porosidad total, medida por intrusión de mercurio, a los 91 días de curado. Los hormigones con cemento *G* presentan una porosidad total mayor que los fabricados con cemento *F*. Esta figura muestra que los aumentos de porosidad disminuyen la resistencia a compresión.

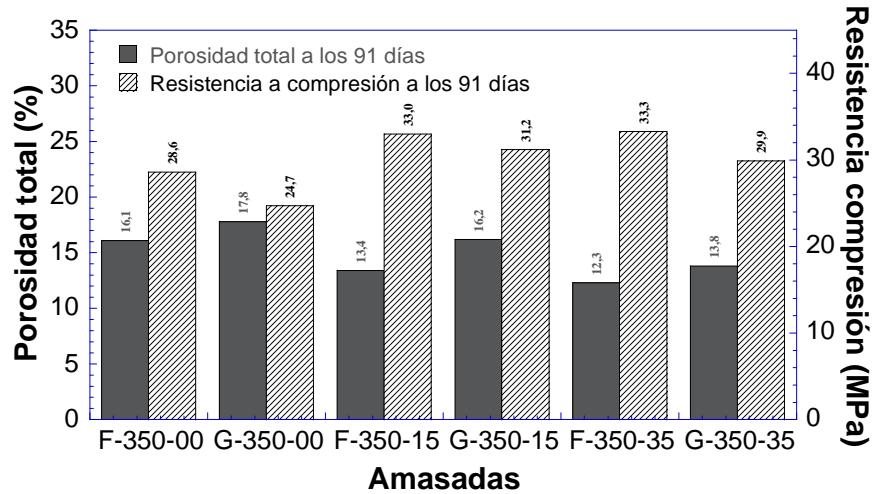


Figura 7: Resistencia a compresión y porosidad total por intrusión de mercurio a los 91 días de curado.

La Figura 8 muestra la distribución de poros de las muestras estudiadas. Los hormigones con cemento *G* presentan un mayor volumen de *meso-poros* que los fabricados con cemento *F*. En el caso de los hormigones con adición de cenizas, los hormigones con cemento *G* tienen menor volumen de *macro-poros* que los hormigones con cemento *F*.

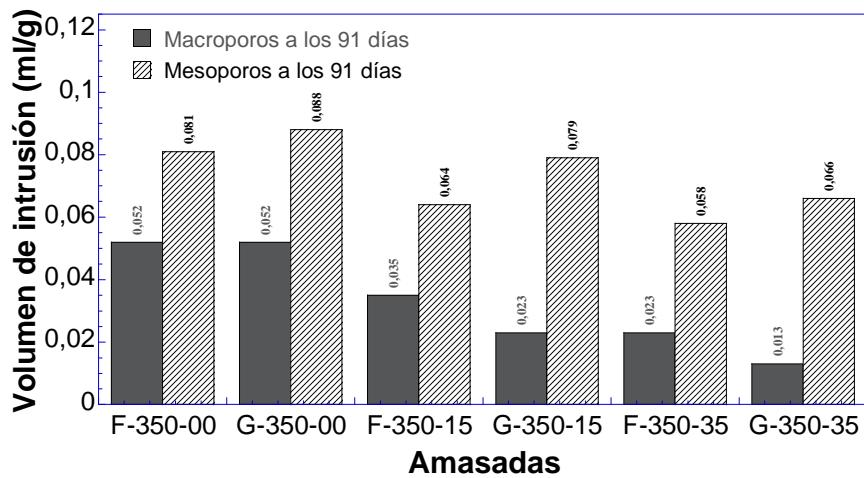


Figura 8: Distribución de poros por intrusión de mercurio a los 91 días de curado.

DISCUSIÓN

Los ensayos realizados muestran claramente una mejora de la resistencia a compresión de los hormigones con adición de cenizas, especialmente a los 91 días, para los cementos estudiados. La mejora en la resistencia a tracción indirecta también se aprecia, aunque es menos acusada.

Los distintos porcentajes de cenizas utilizados muestran que existe un valor óptimo frente al comportamiento mecánico en un porcentaje entre el 15 y el 35%, para el coeficiente de eficacia empleado. Este hecho es explicable si se admite una variación del factor de eficacia de la ceniza en función del porcentaje que se emplea. Valores de adición cercanos al 15% parecen proporcionar factores de eficacia altos por el mejor contacto entre la ceniza y los productos de hidratación del cemento, imprescindible para la reacción puzolánica de las cenizas. Un valor elevado de ceniza parece dificultar el óptimo aprovechamiento de la ceniza por dificultar el contacto entre la Portlandita y la ceniza volante y disminuye su coeficiente de eficacia.

El comportamiento frente a permeabilidad de los hormigones ensayados muestra una gran dependencia del diámetro medio de poro para cada cemento estudiado. Para la misma o similar constitución de la matriz, una reducción en el tamaño de poro conlleva una reducción en los valores de permeabilidad.

La reducción de porosidad total en el hormigón para cada cemento estudiado con las distintas adiciones de ceniza conlleva un aumento de resistencia. Sin embargo tanto el valor de la porosidad total como el de la resistencia a compresión muestran una tendencia a la estabilización a medida que se aumenta el contenido de ceniza.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados permiten mejorar la comprensión del comportamiento de los hormigones con cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland. De los resultados obtenidos se puede concluir que:

Las cenizas volantes contribuyen a mejorar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad) del hormigón a medio plazo (ensayos a 91 días).

Las cenizas volantes contribuyen a disminuir la permeabilidad del hormigón a medio plazo (ensayos a 91 días). Esta mejora se manifiesta, además en la modificación del diámetro medio de poro y en su distribución de tamaños.

El comportamiento de los hormigones con cenizas volantes varía en función de las características físicas y químicas de los cementos empleados, a pesar de que estos estén catalogados bajo la misma designación de cementos comunes. En este trabajo se han empleado dos cementos CEM I 42.5 R.

Para los cementos empleados y las dosificaciones ensayadas, la mejora de las propiedades del hormigón parece indicar que el valor óptimo de contenido de ceniza debe estar próximo al 15% de sustitución

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Prof. Manuel Fernández Cánovas y a la Dra. Ana M. Guerrero Bustos por su asesoramiento en el desarrollo del trabajo. También agradecen a los Ministerios de Educación y Ciencia y de Fomento las ayudas económicas concedidas a través de los proyectos BIA2005-09250-C03-02 y MFOM 2004/9. Así como al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) la financiación parcial de los ensayos. Además, agradecen al Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico la ayuda económica para la estancia de Prof. Omar I. Molina Bas en la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- ACI Committee 232 (2002). "Guide to Durable Concrete", American Concrete Institute, Michigan.
- ASTM D4404 – 84 (2004). "Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania.
- EHE-98 (1998). "Instrucción Española de Hormigón Estructural", Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- Comité Euro-International du Béton (1992). *Durable Concrete Structure: Design Guide*, Thomas Telford Ltd., Londres.
- ISO 13320-1 (1999). "Particle size analysis. Laser diffraction methods. Part 1: General principles", *International Organization for Standardization*, Ginebra, Suiza.
- Koch, G.H., Brongers, M.P.H., Thompson, N.G., Virmani, Y.P., y Payer, J.H. (2002). "Corrosion Costs by Industry Sector", *Supplement to Materials Performance*, pp. 4 - 8.
- Naik, T.R., Singh, S.S. y Hossain, M.M. (1994). "Permeability of concrete containing large amount of fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No 5, pp. 913 - 922.
- Pihlajavaara, S.E. y Paroll, H. (1975). "On the correlation between permeability properties and strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 5, pp. 321 - 328.
- RC-03 (2003). "Instrucción para la Recepción de Cementos", Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- Smith, J.L. y Virmani., Y.P. (2000). "Materials and Methods for Corrosion Control Reinforced and Prestressed Concrete Structure in New Construction", Report 00-081, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, McLean, Virginia.
- UNE 80304 (2006). "Cemento. Cálculo de la composición potencial del clínker Portland", *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, España.
- UNE-EN 933-1 (1998). "Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado", *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, España.
- UNE-EN 12390-8 (2001). "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua a presión", *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, España.