

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS ADICIONES MINERALES COMO  
SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PÓRTLAND EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN**

Por:

DANEL GUZMÁN DURÁN

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2012

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Omar I. Molina Bas, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Antonio A. González Quevedo, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Felipe J. Acosta Costa, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
José R. Cedeño, Ph.D.  
Representante de la Oficina de Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ismael Pagán Trinidad, M.S.C.E.  
Director del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

\_\_\_\_\_  
Fecha

## **ABSTRACT**

The use of mineral admixtures as substitute of cement in concrete is widely extended for various reasons. The reduction of doses of cement in the concrete mixtures reduces the material costs, decreases the pollution and helps solve the problem of the elimination of the "by-products". Moreover, the microstructural changes motivated by the mineral admixtures should generate a more compact concrete and a reduction in the average size of the pores. This can contribute to the improvement of the mechanical properties and durability of concrete.

The efficacy of the use of the mineral admixtures is complex, hard to generalize and depends on the availability of materials in the local markets. This is because of variations in the physical and chemical properties of the mineral admixtures and the cements employed despite their classification under the same standard. Due to these factors, the importance of the changes in composition and microstructure in the mechanical properties and the durability of the material are not completely clear. This work studies the influence of various mineral admixtures available in the local market of Puerto Rico and the Caribbean as a substitute for Portland cement: fly ash, slag, and volcanic ash, on the mechanical properties and durability of concrete to determine if the combination of these products helps to improve the concrete which is produced in the same. The

substitution levels fluctuate between 12.5% and 25% of the cementations material, including combinations. Those resulting concretes have been mechanically characterized and its porous structure has been studied through mercury intrusion porosimetry. Moreover, its resistance was measured to the diffusion of aggressive agent, chloride ion. The results manifest the relevance of local adjustments in function of the properties in the admixtures and cements used.

The use of fly ash type F as a partial replacement of 25% of Portland cement in concrete mixtures is one of the best options to optimize concrete mixtures in terms of mechanical properties and durability, if does not require high performance before 91 days of curing. If you require high performance at ages as young as 7 days of cure, employing blast furnace slag as a partial replacement of 25% of Portland cement is one of the best options. Volcanic ash from the island of Monserrat significantly improves the mechanical properties in terms of compressive strength. However, it contributes to, but in any case also worsens, the durability of the material in terms of chloride ion penetration. Confirming the investigators hypothesis that an improvement in the mechanical properties does not necessarily improve the durability. The use of combinations of mineral additions refines the pores of the concrete, increases the compressive strength values and the resistance to penetration of chloride ion compared to similar concretes not using minerals additions.

## RESUMEN

El uso de adiciones minerales como sustituto del cemento Pórtland en el hormigón está ampliamente extendido por varias razones. Entre estas destacamos que la reducción de la dosis de cemento en las mezclas de hormigón abarata los costes del material, disminuye la contaminación asociada a la producción de cemento y ayuda a solucionar el problema de eliminación de los residuos o los llamados “by products”. Además, los cambios microestructurales motivados por las adiciones minerales suelen generar un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro.

La eficacia del uso de las adiciones minerales es compleja, difícil de generalizar y depende de los materiales disponibles en los mercados locales. Esto se debe a las variaciones en las propiedades físicas y químicas de las adiciones minerales y de los cementos empleados a pesar de que estén clasificados bajo el mismo estándar. Debido a estos factores la importancia relativa de los cambios de composición y microestructurales en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material no están completamente claras. Este trabajo estudia la influencia de adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico como sustituto del cemento Pórtland: cenizas volantes, escorias de alto horno, cenizas volcánicas, en las propiedades

mecánicas y durabilidad del hormigón para determinar si la combinación de estos productos contribuye a mejorar el hormigón que en la misma se fabrica. Los niveles de sustitución fluctúan entre 12.5% y 25% en peso del total de material cementicio, incluyendo combinaciones de hasta dos adiciones por mezcla. Los hormigones obtenidos se han caracterizado mecánicamente y se ha estudiado su estructura porosa mediante porosimetría de intrusión de mercurio. Además, se midió su resistencia a la difusión del agente agresivo ión cloruro. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la relevancia de ajustes locales en función de las propiedades de las adiciones y los cementos empleados.

El empleo de cenizas volantes tipo *F* como sustituto parcial del 25% del cemento Pórtland en mezclas de hormigón es una de las mejores opciones para optimizar las mezclas de hormigón en términos de propiedades mecánicas y durabilidad, sí, no se requieren altas prestaciones antes de los 91 días de curado. Si se requieren altas prestaciones a edades tan tempranas como los 7 días de curado el empleo de escorias de alto horno como sustituto parcial del 25% del cemento Pórtland es una de las mejores opciones. Las cenizas volcánicas de la isla de Monserrat mejoran de forma significativa las propiedades mecánicas en términos de resistencia a compresión. Sin embargo, no contribuye, aunque en todo caso tampoco empeora, la durabilidad del material en términos de la penetración del ion cloruro. Se confirman las hipótesis de investigadores en términos de que una mejora en las propiedades mecánicas no implica necesariamente mejoras de las características de durabilidad. El empleo de combinaciones de adiciones minerales refina la estructura porosa del hormigón, incrementa los valores de resistencias a compresión y los de resistencia a la penetración del ión cloruro respecto a los de hormigones similares que no empleen adiciones minerales.

Copyright© 2012 por Danel Guzmán Durán. Todos los derechos reservados. Impreso en los Estados Unidos de América. A excepción de lo establecido en el Copyright Act de 1976 de los Estados Unidos, ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida en cualquier forma o por cualquier medio, o almacenada en una base de datos o sistema de recuperación de información, sin la previa autorización por escrito del editor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por ser mi guía, por su apoyo, por su paciencia y su amor. Agradezco especialmente a los doctores Omar Molina Bas, Antonio González Quevedo y Felipe Acosta, presidente y miembros de mi comité graduado respectivamente, por su ayuda y apoyo para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Agradezco a la doctora Amparo Moragues Terrades por su asesoramiento en diversas etapas de este trabajo. A los profesores José F. Lluch, José L. Perdomo, José O. Guevara e Ingrid Padilla por ofrecerme sus conocimientos y consejos en todas las fases de la investigación. Al personal de Essroc San Juan, Ing. Francisco Bravo, Juan M. Rivera e Ing. Rubén Segarra por su gran ayuda y atención en el proceso de ensayos en sus laboratorios. A Monserrate Cruz y María Aránzazu Hueso por su esmero y enseñanza de los manejos de equipos de los laboratorios de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y de la Universidad Politécnica de Madrid respectivamente. Además, agradezco la confianza depositada de la Universidad de Puerto Rico traducida en su ayuda económica para la culminación exitosa de esta investigación y mis estudios.

Quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que de alguna manera han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a mi novia Glory Bel Pérez por ser mi bastón, por su apoyo incondicional y constante sin importar la hora y el momento. Al Ing. Juan Elías Pérez y Doña Gloria Reyes, que considero son mis segundos padres, por sus apoyos, marcadas enseñanzas y latentes consejos, Lic. Julio Cesar Valentín por su ayuda para que el inicio de mi investigación pudiera concretizarse. A mi familia: Rosa Altagracia Durán, que es la alfarera y protagonista silenciosa de mi vida, a Pedro Guzmán, Danelissa Guzmán, Melissa Guzmán, Pedro Danel Guzmán, Ana Mercedes Guzmán, José Marcelino Durán, Eddy Altagracia López, Angel Durán y demás familiares, a las hermanas y hermanos de la congregación Siervas y Siervos de Cristo Resucitado, a mis queridos hermanos en Cristo del Ministerio Impacto Juvenil, a mis amigos Miguel Suárez, Elinic Almonte, Juan Fernández, Alma Paola Sagredo, Yahaira Vásquez, Luis Zapata y Ángel Alicea.

## INDICE

LISTA DE TABLAS .....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Preámbulo.....	1
1.2    Objetivo.....	1
1.3    Efecto del uso de las adiciones minerales en el medio ambiente.....	2
1.4    Efecto económico del uso de adiciones minerales.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	5
2.1    Introducción .....	5
2.2    Cemento .....	6
2.3    Durabilidad del hormigón con adiciones minerales.....	7
2.4    Ataques al hormigón .....	8
2.4.1 Ataques Físicos.....	8
2.4.2 Ataques Químicos.....	11
2.5    Factores que afectan la durabilidad.....	12
2.6    Mecanismo de transporte de agentes agresivos a través del hormigón.....	14
2.6.1 Introducción.....	14
2.6.2 Difusión .....	15
2.6.3 Convección.....	15
2.6.4 Migración iónica.....	15
2.6.5 Absorción Capilar.....	16
2.6.6 Permeabilidad .....	16
2.6.7 Factores que condicionan la entrada de los agentes agresivos .....	16
2.7    Sustitutos del cemento en el hormigón .....	17
2.8    Escoria de alto horno.....	17
2.8.1 Características del hormigón con escoria de alto horno.....	18
2.9    Cenizas Volantes.....	19

2.9.1 Características del hormigón con cenizas volantes .....	21
2.10 Cenizas Naturales .....	22
2.10.1 Características del hormigón con cenizas naturales .....	23
2.11 Propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con adiciones minerales .....	24
CAPÍTULO 3 .....	27
CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	27
3.1 Introducción .....	27
3.2 Materiales .....	27
3.3 Dosificación .....	29
3.4 Fabricación de las probetas de hormigón .....	30
3.5 Procedimiento experimental .....	31
3.5.1 Propiedades mecánicas: determinación de la resistencia a compresión .....	31
3.5.2 Propiedades físico-químicas: estructura porosa .....	32
3.5.3 Mecanismo de transporte: Penetración del ión cloruro .....	36
CAPÍTULO 4 .....	39
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	39
4.1 Introducción .....	39
4.2 Resistencia a compresión .....	40
4.3 Resistencia a penetración ión cloruro .....	44
4.4 Resistencia a compresión y resistencia a penetración ión cloruro .....	45
4.5 Porosimetría por intrusión de mercurio .....	46
4.6 Diámetro umbral y resistencia a compresión .....	57
4.7 Diámetro umbral y porosidad mediante porosimetría por intrusión de mercurio .....	58
4.8 Diámetro umbral y resistencia a penetración ión cloruro .....	59
4.9 Diámetro crítico y resistencia a compresión .....	59
4.10 Diámetro crítico y porosidad mediante porosimetría por intrusión de mercurio .....	60
4.11 Diámetro crítico y resistencia a penetración ión cloruro .....	61
4.12 Resistencia a compresión y porosimetría por intrusión de mercurio .....	61
4.13 Porosimetría por intrusión de mercurio y resistencia a penetración ión cloruro .....	62
4.14 Valoración estadística .....	63
4.14.1 Valoración estadística: análisis de varianza .....	63

4.14.2 Valoración estadística: regresión polinomial de la muestra .....	73
CAPÍTULO 5 .....	80
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	80
5.1 Introducción .....	80
5.2 Conclusiones propiedades mecánicas: Resistencia a compresión.....	81
5.2.1 Escoria de alto horno .....	81
5.2.2 Cenizas volantes .....	81
5.2.3 Cenizas volcánicas.....	81
5.2.4 Combinación de adiciones.....	82
5.3 Conclusiones propiedades de durabilidad: Permeabilidad al ión cloruro .....	82
5.4 Conclusiones de propiedades físicas: Porosimetría por intrusión de mercurio.....	83
5.5 Aportación al conocimiento .....	83
5.6 Trabajos futuros.....	84
5.6.1 Estudios destinados a establecer mejor comparación entre adiciones minerales. ....	85
5.6.2 Comportamiento del material en ambientes reales.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Componentes principales del cemento Pórtland	6
Tabla 2.2	Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el hormigón	12
Tabla 2.3	Características químicas de cenizas volantes según sus clases	20
Tabla 2.4	Características físicas de cenizas volantes según sus clases	20
Tabla 3.1	Composición química, mineralógica y propiedades físicas del	28
Tabla 3.2	Dosificaciones por metro cúbico de hormigón	30
Tabla 3.3	Ensayos realizados	31
Tabla 4.1	Penetración Ión Cloruro basado en la carga que pasa, 180 días de curado	45
Tabla 4.2	Porosimetría por intrusión de mercurio: Porcentaje de porosidad total interconectada	50
Tabla 4.3	Parámetros obtenidos de la porosimetría por intrusión de mercurio	56
Tabla 4.4	Modelo ANOVA para un modelo factorial de dos factores con efectos fijos	64
Tabla 4.5	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a todas las edades de curados	66
Tabla 4.6	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 7 días de curado	66
Tabla 4.7	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 28 días de curado	67
Tabla 4.8	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 91 días de curado	68
Tabla 4.9	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 180 días de curado	68
Tabla 4.10	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión	69
Tabla 4.11	Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión	70

Tabla 4.12	Modelo ANOVA para la variable dependiente: penetración ión cloruro a los 180 días de curado	71
Tabla 4.13	Modelo ANOVA para la variable dependiente: penetración ión cloruro a los 180 días de curado	72
Tabla 4.14	Regresión polinomial: resistencia penetración ión cloruro a 180 días de curado	77
Tabla 4.15	Regresión polinomial: resistencia penetración ión cloruro a los 180 días de curado	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Relación entre los principales factores de durabilidad y el comportamiento estructural	13
Figura 3.1 (a)	X-Ray Fluorescence Spectrometry, prueba analítica no destructiva para identificar y determinar las concentraciones de elementos presentes en el cemento y adiciones	29
Figura 3.1 (b)	Humboldt MGF, equipo utilizado para medir las finezas de los materiales cementantes	29
Figura 3.2	Hormigonera	30
Figura 3.3	Secuencia del ensayo mecánico: Resistencia a Compresión	32
Figura 3.4 (a)	Porosímetro	36
Figura 3.4 (b)	Muestra colocada en el penetrómetro	36
Figura 3.4 (c)	Penetrómetro con la muestra relleno de mercurio en la cámara de alta presión	36
Figura 3.5 (a)	Corte (Rebanada de 2'' arriba y abajo) de los dos especímenes por muestra	38
Figura 3.5 (b)	Impermeabilización superficie expuesta	38
Figura 3.5 (c)	Celdas donde se colocan los especímenes	38
Figura 3.5 (d)	Vacuum, máquina para vacío	38
Figura 3.5 (e)	Solución NaCl en celdas	38
Figura 3.5 (f)	Celdas, fuente de alimentación, medidor de corriente y computador para las pruebas	38
Figura 4.1	Resistencia a compresión del hormigón de referencia REF (100%)	40
Figura 4.2	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA25	41
Figura 4.3	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-SLAG25	41
Figura 4.4	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC87.5-VA12.5	42

Figura 4.5	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA12.5-SLAG12.5	42
Figura 4.6	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA12.5-VA12.5	43
Figura 4.7	Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-SLAG12.5-VA12.5	43
Figura 4.8	Comparación de resistencia a compresión media de todos los hormigones estudiados	44
Figura 4.9:	Penetración ión cloruro basada en la carga pasando y la resistencia a compresión	46
Figura 4.10	Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado REF(100%)	46
Figura 4.11	Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-FA25	47
Figura 4.12	Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-SLAG25	47
Figura 4.13	Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC87.5-VA12.5	48
Figura 4.14	Volumen de intrusión acumulado del hormigón PC75-FA12.5-SLAG12.5	48
Figura 4.15	Volumen de intrusión acumulado del hormigón PC75-FA12.5-VA12.5	49
Figura 4.16	Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-SLAG12.5-VA12.5	49
Figura 4.17	Volumen de intrusión acumulado medio de todos los hormigones estudiados	50
Figura 4.18	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado REF(100%)	51
Figura 4.19	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC75-FA25	52
Figura 4.20	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC75-SLAG25	52
Figura 4.21	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC87.5-VA12.5	53

Figura 4.22	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-FA12.5-SLAG12.5	53
Figura 4.23	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-FA12.5-VA12.5	54
Figura 4.24	Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-SLAG12.5-VA12.5	54
Figura 4.25	Logaritmo de la intrusión diferencial media de todos los hormigones estudiados	55
Figura 4.26	Superposición volumen intrusión acumulado vs logaritmo intrusión diferencial del conjunto de amasados.	56
Figura 4.27	Diámetros críticos y umbral por cada dosificación	57
Figura 4.28	Diámetro umbral y resistencia a compresión por cada dosificación	58
Figura 4.29	Diámetro umbral y volumen de poros conectados por cada dosificación	58
Figura 4.30	Diámetro umbral y resistencia a penetración ión cloruro por cada dosificación	59
Figura 4.31	Diámetro crítico y resistencia a compresión por cada dosificación	60
Figura 4.32	Diámetro crítico y volumen de poros conectados por cada dosificación	60
Figura 4.33	Diámetro crítico y resistencia a penetración ión cloruro por cada dosificación	61
Figura 4.34	Volumen de poros conectados y resistencia a la compresión	62
Figura 4.35	Volumen de poros conectados y penetración del ión cloruro basado en la carga pasando	62
Figura 4.36	Penetración del ión cloruro basado en la carga pasando vs volumen de mercurio en mesoporos	77
Figura 4.37	Penetración del ión cloruro basado en la carga pasando vs diámetro crítico de poros	78

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Preámbulo**

Los resultados que se obtienen del uso de las adiciones minerales en la mezcla de hormigón es difícil de generalizar, principalmente por las variaciones en las propiedades físicas y químicas de las adiciones minerales y de los cementos empleados a pesar de que estén clasificados bajo la misma designación. Asimismo, en la práctica profesional se ve significativamente influenciada por factores económicos y ambientales, limitando las posibilidades a los materiales disponibles en los mercados locales. Estas variables influyen en la microestructura del hormigón, modificando sus propiedades mecánicas y la durabilidad del mismo. Esta situación obliga, a experimentar continuamente sobre las posibilidades de adiciones minerales en el hormigón.

#### **1.2 Objetivo**

Esta investigación consiste en estudiar experimentalmente el efecto de las adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico como sustituto parcial del cemento

Pórtland. Con el fin de determinar si la combinación de estos productos contribuye a mejorar el hormigón.

Se tiene como objetivo específico estudiar las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad de hormigones que empleen adiciones minerales y probar diferentes combinaciones de adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico.

### **1.3 Efecto del uso de las adiciones minerales en el medio ambiente**

Uno de los principales objetivos del empleo de sustitutos del cemento, además de la búsqueda de materiales con mejores propiedades y más económicos, es de carácter medio ambiental. Unas de las principales razones para su uso es intentar disminuir la fabricación del cemento Pórtland, ya que el proceso de clinkerización genera altos volúmenes de gases de efecto invernadero. Es conocido que por cada tonelada de cemento producida, se generan aproximadamente 900 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (United Kingdom Quality Ash Association 2011). Esto motiva a una búsqueda de hormigones con dosis bajas de cemento Pórtland y la sustitución del cemento por otros materiales.

La utilización de adiciones minerales que en su mayoría son subproductos o *by products* por su término en inglés, de otras industrias implica un doble beneficio, la disminución de la dosis de cemento con sus implicaciones y la reutilización de un residuo industrial de difícil disposición y catalogado por algunos como peligroso. Las escorias de alto horno son un sub-producto de la manufactura del hierro y el acero que constituyen el residuo metalúrgico fundido que flota sobre el arrabio en el crisol del horno alto y las cenizas volantes son residuos producido en centrales termoeléctricas como un subproducto industrial de la combustión de carbón. Ambos, en el caso de no emplearse, se depositan en rellenos sanitarios especializados. Se estima que una tonelada de cenizas ocupa un espacio similar a 928 kg de desperdicios domésticos sólidos (ACAA 2011),

lo que reduce de manera acelerada la vida útil de los rellenos sanitarios. La *American Coal Ash Association* (ACAA, siglas en inglés) estimó en el 2007 que en los EE.UU. se producen alrededor de 71.7 millones de toneladas de cenizas volantes, donde el 44% de éstas se reutiliza y que el 43% de esa reutilización es como adición al cemento (ACAA 2011). En el caso de las cenizas naturales, que son desechos tras erupciones volcánicas, no son consideradas como un subproducto, pero su acumulación puede conducir a la destrucción inmediata de los ecosistemas aledaños. Las cenizas volcánicas no son venenosas, pero la inhalación de estas puede causar problemas de salud de índole respiratorio y la textura abrasiva puede causar la irritación y el rasguño de la superficie de los ojos (GNS Science Te Pū Ao 2011).

#### **1.4 Efecto económico del uso de adiciones minerales**

En el aspecto económico un estudio realizado por Isaia (2000) revela que una reducción de hasta el 67% de los requerimientos de energía y un 80% en el costo de los materiales de cementación se puede esperar cuando un 50% de adiciones puzolana es utilizado. Con un 25% de puzolanas añadido, las necesidades de energía pueden disminuir un 33% y los costos en un 20% (Isaia 2000).

Bouzoubaa y Fournier (2002) evaluaron los posibles ahorros de materiales que supone para el mercado norteamericano la incorporación de cenizas volantes. En hormigones donde no se requiera alta resistencia inicial se pueden alcanzar 40 MPa en compresión a los 28 días, utilizando 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento y una relación de cenizas/cemento de hasta 50%. En los casos donde sean necesarias altas resistencias iniciales, los investigadores sugieren el uso de 350 kg/m<sup>3</sup> de cemento y una relación cenizas/cemento de 40%, para obtener hormigones con hasta 10 MPa en 24 horas. El ahorro estimado para las mezclas donde no se requieren altas resistencias iniciales es cercano al 30%. Para el caso de resistencias iniciales elevadas, el ahorro puede llegar

al 14%. Estos valores sólo consideran los materiales y no estiman los posibles beneficios que representaría el uso de cenizas volantes en la estructura, así como ahorros en transporte y disposición en vertederos (Bouzoubaa and Fournier 2002).

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO

#### 2.1 Introducción

El hormigón es una piedra artificial que está formada básicamente de cemento, agua, agregados, aire y aditivos, mezclados entre sí, formando una pasta conglomerante que según su dosificación, posee diferentes propiedades mecánicas, químicas y de durabilidad. Donde cada característica puede ser modificada al alterar las dosis de los materiales empleados o mediante el uso de aditivos químicos y adiciones minerales.

Los aditivos químicos son utilizados con frecuencia con el propósito de reducir la dosis de agua para una manejabilidad dada, retardar o acelerar el fraguado, entre otros muchos. El empleo de adiciones minerales es conocido hace mucho tiempo, pero comenzó a cobrar fuerza a mediados del siglo pasado al aumentar el interés en los hormigones de altas prestaciones. Las más comunes son: las escorias de alto horno (*slag* por su término en inglés), las cenizas volantes (*fly ash* por su término en inglés), las puzolanas naturales como algunas cenizas volcánicas y el humo de sílice (*silica fume* por su término en inglés) entre otras.

## 2.2 Cemento

El cemento Pórtland, es uno de los principales componentes del hormigón. El mismo es un conglomerante hidráulico, un material inorgánico que cuando se mezcla con agua, forma una pasta que se fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad volumétrica, incluso bajo el agua (Le Bellego, Gérald and Pijaudie-Cabot 2000).

El cemento Pórtland está formado, básicamente, por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción de una mezcla de caliza y arcilla que recibe el nombre de *clinker* y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente, es yeso hidratado con dos moléculas de agua. El *clinker* está formado por una mezcla de silicatos, aluminato y ferrito aluminato de cal. Esto hace que en la composición de las materias primas que van a formar el crudo, es decir, el material que se cuece en el horno, han de estar los óxidos de sílice, aluminio, hierro y cal en proporciones muy concretas (Fernandez Cánovas 2004). En la tabla 2.1 se muestran los componentes principales del cemento Pórtland.

Tabla 2.1: Componentes principales del cemento Pórtland.

Componente	Fórmula química	Fórmula abreviada
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferrito aluminato tricálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$

**Fuente: (UNE 80300: 2000 IN)**

### 2.3 Durabilidad del hormigón con adiciones minerales

En Puerto Rico, las infraestructuras de hormigón están expuestas frecuentemente a ambientes agresivos, en especial el marino. La construcción en ambientes marinos es muy perjudicial al hormigón si este no está protegido adecuadamente. El agua de mar transporta agentes agresivos y uno de los más extendidos y agresivos que accede al interior del hormigón a través de su red porosa es el ión cloruro.

El tiempo que tardan los iones cloruros en penetrar al hormigón depende fundamentalmente de la concentración que exista de los mismos, del espesor y calidad del recubrimiento, tipo y dosificación de cemento, relación agua/cemento, curado, temperatura, espesor y cantidad de fisuras en el recubrimiento (ACI 201.2R 2001). Al penetrar dentro del hormigón da inicio a la corrosión, un proceso que no solo determina la pérdida del metal con las consiguientes limitaciones en su comportamiento, sino que además, da inicio a la formación de los productos de oxidación expansivos que pueden agrietar el hormigón acelerando la degradación de ambos materiales del elemento compuesto.

La variabilidad de las propiedades químicas y físicas del cementos y las adiciones minerales no permiten garantizar el comportamiento de los hormigones que emplean adiciones minerales si no están comprobadas experimentalmente. Aunque en términos generales encontramos que en numerosas ocasiones las adiciones minerales suelen contribuir a la densificación del hormigón, creando una estructura porosa más cerrada, lo que dificulta la entrada de los agentes agresivos que atacan al acero de refuerzo y al hormigón. Esto contribuye a la creación de un hormigón más duradero.

No obstante, existen otros métodos para proteger las infraestructuras construidas con hormigón y hormigón armado. Sin embargo, investigadores como Metha (1999) establecen que

es demasiado temprano para predecir el futuro de los inhibidores de corrosión, barras de refuerzos revestidas con resina de epoxi, capas superficiales y protección catódica, debido a que cuando se compara a los hormigones con altos volúmenes de cenizas volantes o escorias de alto horno, los altos costes de los primeros y perjuicio ambiental, son claramente una desventaja importante (Mehta 1999). Fernández Cánovas añade que lo más adecuado para proteger las barras de refuerzos es colocar un hormigón de buena calidad (Fernandez Cánovas 2004).

## **2.4 Ataques al hormigón**

El hormigón está sometido a unas sollicitaciones mecánicas para las cuales fue previamente diseñado, pero además está expuesto a unas acciones de tipos físicas y químicas que pueden llegar a producir su degradación. La degradación puede ser ya sea como consecuencia de la corrosión del acero, como por ataques agresivos directos sobre el propio hormigón, o bien por una combinación de ambas acciones.

Para que en el hormigón se produzcan los ataques químicos y la mayoría de los ataques físicos, tanto los deseables como los perjudiciales, se necesita agua. El calor proporciona la energía que activa los ataques. Los efectos combinados del agua y el calor, junto con otros elementos ambientales deben ser monitoreados. Seleccionar materiales apropiados cuya composición sea la adecuada y procesarlos correctamente de acuerdo con las condiciones ambientales existentes es fundamental para lograr un hormigón durable que sea resistente a los efectos perjudiciales del agua, soluciones agresivas y temperaturas extremas (ACI 201.2R 2001).

### **2.4.1 Ataques Físicos**

El hormigón endurecido puede deteriorarse como consecuencia de acciones físicas de naturaleza muy diferentes. Los ataques físicos más comunes son: cambios térmicos, heladas, abrasión, erosión, impactos, fuego, sobrecargas estáticas o dinámicas, entre otras.

### 2.4.1.1 Heladas

Al igual que ocurre con cualquier material permeable, el agua puede penetrar en el interior del hormigón, y si ésta se congela, dará lugar a tensiones importantes de tracción que podrán destruirlo. A este ataque se le conoce como acción de los ciclos hielo-deshielo. Esto se produce ya que al agua al helarse experimenta un incremento volumétrico cercano a un 9%. La temperatura a la que se produce la congelación del agua en el interior del hormigón no puede asegurarse que sea la misma que la del agua situada en espacios abiertos, pues depende de factores como, presión capilar, sales sueltas procedentes del propio hormigón, entre otros.

El agua contenida en los poros del hormigón esta en forma de solución débilmente alcalina con lo cual, hasta que no se supera el punto de congelación, no tiene lugar la formación de hielo. Al ocurrir esto, en la porción de agua no helada aumenta la concentración en sales disueltas con lo cual se crea un potencial osmótico que impele a las moléculas de agua desde los poros no helados hacia las cavidades heladas dando lugar a que la dilución resultante de la disolución en contacto con las zonas heladas haga aumentar la presión, creando tensiones que pueden llegar a fisurar a la pasta de cemento (Fernandez Cánovas 2004).

El hormigón que ha de estar expuesto a una combinación de humedad y ciclos de congelamiento exige lo siguiente:

- Un diseño de la estructura que minimice su exposición a la humedad
- Baja relación agua/cemento
- Adecuada incorporación de aire
- Materiales de buena calidad
- Adecuado curado antes del primer ciclo de congelamiento
- Particular atención a las prácticas constructivas.

### 2.4.1.2 Abrasión

La abrasión del hormigón en su superficie se produce cuando sobre ella fricciona otro cuerpo. Puede ser debida a acciones de tipo mecánico provocadas por el aire que arrastra partículas o por la acción de elementos granulares deslizados sobre la superficie. La resistencia al desgaste de un hormigón está relacionada a su resistencia a compresión. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos. La abrasión y los impactos provocarán una degradación adicional relacionada con la resistencia de la adherencia entre la pasta y los agregados y la dureza de los mismos (ACI 201.2R 2001).

Para un hormigón con elevada resistencia a la abrasión es necesario:

- Evitar la segregación de los componentes
- Eliminar la exudación
- Establecer un adecuado tiempo para el acabado
- Minimizar la relación agua-cemento (prohibiendo agregar agua a la superficie para facilitar su acabado)

### 2.4.1.3 Fuego

La acción del fuego sobre el hormigón es un ataque que genera modificaciones en sus componentes:

- A partir de los 100 grados centígrados el agua libre o capilar incluida en la masa del mismo empieza a evaporarse retardando su calentamiento.
- Entre 200 y 300 grados centígrados, la pérdida de agua capilar es completa sin que se aprecien aún alteraciones en la estructura del cemento hidratado y sin que las resistencias disminuyan de forma apreciable.

- Entre 300 a 400 grados centígrados se produce una pérdida de agua de gel del cemento teniendo lugar una leve disminución de las resistencias y dando lugar a las primeras fisuras superficiales en el hormigón.
- A los 400 grados centígrados una parte del hidróxido de calcio procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en cal viva.
- Hacia los 600 grados centígrados, los agregados, que no tienen todos los mismos coeficientes de dilatación térmica, se expanden fuertemente y con diferente intensidad dando lugar a tensiones internas que empiezan a disgregar al hormigón.

#### 2.4.2 Ataques Químicos

El hormigón puede entrar en contacto con ambientes que pueden ser agresivos desde el punto de vista químico como pueden ser ácidos, iones, medios sulfatados, sales, aceites, grasas, etc., dando lugar a su ataque y deterioro progresivamente (Fernández 1994). Estas condiciones de forma individual o combinada tienen el potencial de reducir notablemente su durabilidad.

La resistencia que presenta el hormigón al ataque químico por determinadas sustancias e incluso por el agua pura, depende de su permeabilidad y de la distribución y tamaño de sus poros (Fernandez Cánovas 2004).

La agresión química puede realizarse de dos formas fundamentales:

- Por disolución de los compuestos fácilmente solubles del propio hormigón o por la formación de sales también solubles y extracción de las mismas o lixiviación cuando haya un acceso continuo de agua
- Por ataque con formación de compuestos insolubles de mayor volumen que los primitivos y que al recristalizar dentro del sistema capilar dan lugar a una expansión que produce tensiones mecánicas capaces de destruir el hormigón.

En la Tabla 2.2 se resumen los efectos que producen en el hormigón algunos agentes químicos habituales (ACI 201.2R 2001).

Tabla 2.2: Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el hormigón.

<b>Velocidad del ataque a temperatura Ambiente</b>	Rápida	Moderada	Lenta	Despreciable
<b>Ácidos inorgánicos</b>	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Fosfórico	Carbónico	-
<b>Ácidos orgánicos</b>	Acético Fórmico Láctico	Tánico	-	Oxálico Tartárico
<b>Soluciones alcalinas</b>	-	Hidróxido de sodio* > 20%	Hidróxido de sodio* 10 a 20%	Hidróxido de sodio* < 10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio
<b>Soluciones salinas</b>	Cloruro de aluminio	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de cinc Cromato de sodio
<b>Otros</b>	-	Bromo (gaseoso) Licor de sulfato	Cloro (gaseoso) Agua de mar Agua blanda	Amoníaco (líquido)

Fuente: (ACI 201.2R 2001)

\* El efecto del hidróxido de potasio es similar al del hidróxido de sodio.

## 2.5 Factores que afectan la durabilidad

Para que en el hormigón se produzcan la mayoría de los procesos físicos y químicos, tanto los deseables como los perjudiciales, se necesita agua (Peurifoy, Ledbetter and Schexnayder 1996). El calor proporciona la energía que activa los procesos. Los efectos combinados del agua y el calor, junto con otros elementos ambientales, son importantes y deben ser considerados y

monitoreados. Seleccionar materiales apropiados cuya composición sea adecuada y procesarlos correctamente de acuerdo con las condiciones ambientales existentes es fundamental para lograr un hormigón durable que sea resistente a los efectos perjudiciales del agua, las soluciones agresivas y las temperaturas extremas (ACI 201.2R 2001). En la Figura 2.1 (CEB 1993) tomada de la Guía de Diseño del Comité Euro-Internacional del hormigón (CEB por sus siglas en francés) se muestra un esquema de la interrelación entre los principales factores que afectan la durabilidad de una estructura de hormigón.

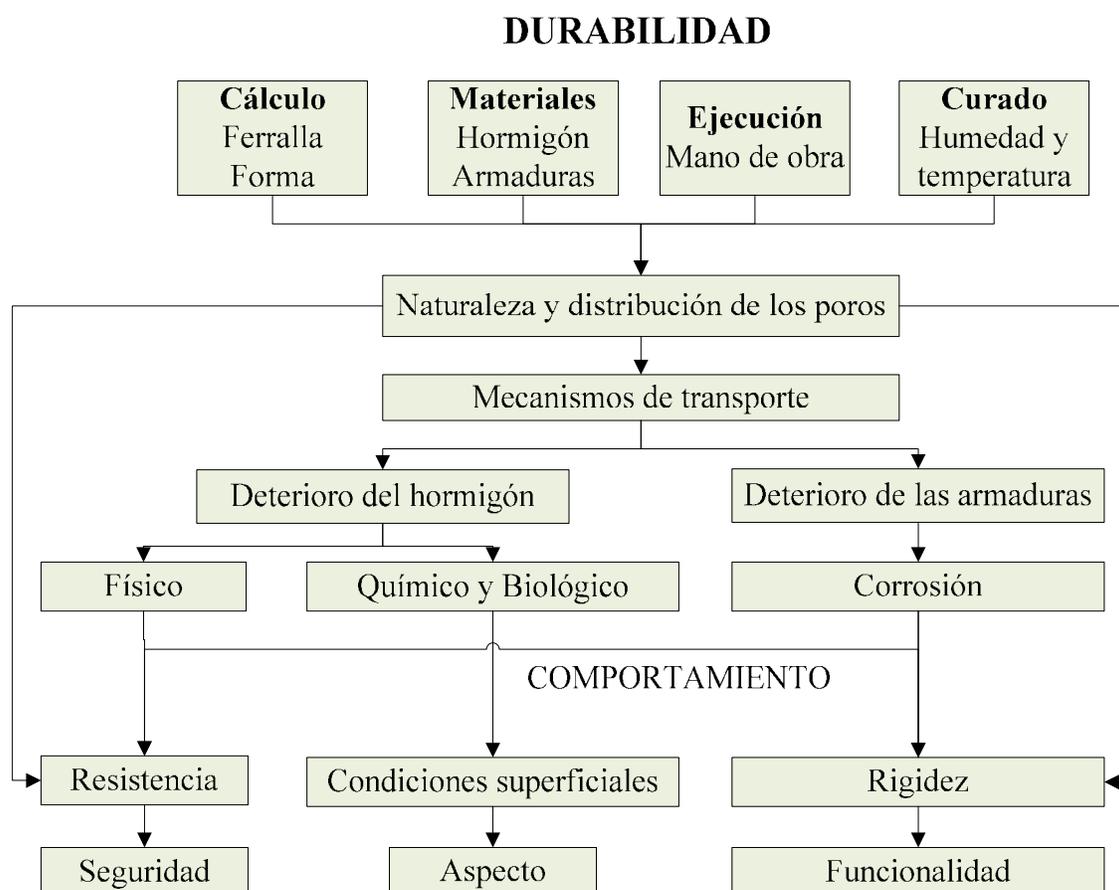


Figura 2.1: Relación entre los principales factores de durabilidad y el comportamiento estructural. Fuente: (CEB 1993)

## 2.6 Mecanismo de transporte de agentes agresivos a través del hormigón

### 2.6.1 Introducción

Hay muchos procesos diferentes que pueden causar el deterioro de una estructura de hormigón u hormigón armado, incluyendo, por ejemplo, la corrosión de la armadura, ataques de sulfatos y daños por ciclos de hielo y deshielo. La característica común a todos estos procesos es que los agentes agresivos requieren ser transportados al interior del hormigón. Para entender cómo mejorar la durabilidad de las estructuras, es esencial tener una comprensión clara de los diferentes procesos de transporte. Estos pueden tener lugar en hormigones agrietados, pero, aun cuando las grietas están presentes, los agentes no se introducirían sin un proceso de transporte.

En general los mecanismos de transporte difieren unos de otros por la fuerza impulsora que actúa:

- Gradientes de concentraciones (Difusión).
- Diferencia en densidad o temperatura (Convección).
- Diferencia de Potencial electrostático (Migración iónica).
- Tensión superficial de los poros (Absorción capilar).
- Diferencia en Presión (Permeabilidad).

Entender los mecanismos de transporte del hormigón es necesario para una evaluación científica de cómo se puede contribuir al proceso de diseño, construcción y reducción de los costos de mantenimiento de las estructura a lo largo de su vida útil. Además, es necesario para prolongar el uso de la misma.

El deterioro del hormigón puede ser causado por el agua en sí, o por productos químicos disueltos en la misma. Muchas moléculas se disocian en dos partes separadas (iones) cuando están en solución, cada parte lleva una carga opuesta. Estos iones provocan interacciones entre

el disolvente y la superficie de los sólidos. Muchos de los mecanismos de deterioro que afectan al hormigón están regulados por las características del material en cuanto al transporte de sustancias, es decir su porosidad. Estos agentes agresivos penetran en estado gaseoso o líquido, transportando sustancias perjudiciales en la solución (ACI 234R 2006).

La incorporación de adiciones minerales modifica la estructura porosa del hormigón. Estas modificaciones pueden cambiar la red porosa del material y como consecuencia las propiedades mecánicas y durables (Molina-Bas 2008).

### **2.6.2 Difusión**

La difusión es un proceso físico en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente de ellas. Este es inducido por la existencia de un gradiente de concentración que tiende a equilibrar los diferentes niveles de concentración. El proceso puede producirse en régimen estacionario (el caudal se mantiene constante en el tiempo) o transitorio.

### **2.6.3 Convección**

El transporte por convección se produce por la diferencia de temperatura existente entre dos zonas del material. Los fluidos existentes en la zona de mayor temperatura aumentan de volumen, por lo tanto, disminuyen su densidad. El fluido tiende a homogenizar sus propiedades para lo que necesita desplazarse hacia las zonas más frías.

### **2.6.4 Migración iónica**

La migración ocurre si entre distintos puntos de un electrolito se producen diferencias en el potencial electrostático. El campo eléctrico resultante es causa de un flujo de carga en sentido del campo. En el hormigón el electrolito es la fase acuosa embebida en los poros del material.

### 2.6.5 Absorción Capilar

La absorción capilar es una succión que se debe a que la superficie libre de los sólidos tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces con otras moléculas cercanas. Esto tiende a compensarse absorbiendo moléculas de agua que están en la superficie y continúa hasta alcanzar un estado de equilibrio. Este proceso depende de las propiedades del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial) y del sólido (estructura porosa).

### 2.6.6 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad del hormigón para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Esta tiene lugar cuando un fluido líquido o gaseoso, atraviesan el material debido a la fuerza impulsora generada mediante un diferencial de presión hidráulica.

### 2.6.7 Factores que condicionan la entrada de los agentes agresivos

Los factores de mayor influencia en la entrada de los agentes agresivos al hormigón se listan a continuación (RILEM\_TC-116-PCD 1999):

- Condiciones ambientales
- La concentración local de las sustancias
- La porosidad total
- La distribución y el tamaño de los poros en el hormigón
- Anchura y número de microfisuras existentes
- Grado de saturación de la red de poros

Generalmente actúan simultáneamente como consecuencia del amplio rango de tamaños de poros y de la enorme variación de humedad que se produce en el hormigón en función de las condiciones de exposición. Como consecuencia del transporte de los agentes agresivos, el

hormigón puede alterar su estructura física por la absorción química de determinados iones sobre las fases sólidas (Armero 1997).

## **2.7 Sustitutos del cemento en el hormigón**

Las adiciones minerales se conforman de aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que pueden añadirse a los morteros y hormigones, como son las escoria de alto horno, las cenizas volantes, las cenizas volcánicas, entre otras, con la finalidad de modificar las propiedades mecánicas y la microestructura de los materiales base cemento (Products, Advancing the Management and Use of Coal Combustion 2011). Estos sustitutos suelen ser residuos resultantes de los principales procesos industriales. Los materiales hidráulicos reaccionan directamente con el agua para formar compuestos cementantes, mientras que los materiales puzolánicos reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (un subproducto de la hidratación del cemento) en presencia de agua para formar compuestos de cementantes.

## **2.8 Escoria de alto horno**

La escoria es un sub-producto de la manufactura del hierro y el acero, constituyen la ganga fundida que flota sobre el arrabio en el crisol del horno alto (Fernandez Cánovas 2004). La escoria (llamada escoria de alto horno) se enfría rápidamente por inmersión en agua y luego se pulveriza por lo general más fino que el cemento Pórtland.

La escoria está clasificada como un material hidráulico y por lo general tiene una demanda de agua similar o ligeramente menor que la de cemento Pórtland. La escoria de alto horno se utiliza habitualmente en un porcentaje de sustitución entre el 30 y el 50% (en masa) del material cementicio y en niveles superiores a 50% para aplicaciones especiales, tales como el hormigonado en masa.

La resistencia a compresión de las mezclas que incorporan escorias es habitualmente menor a que sus referencias sin adiciones minerales a edades tempranas (a menos de 7 días). No obstante, investigadores han identificado que a los 21 días de edad, la resistencias de mezclas que contengan escoria son iguales o mayores que sus referencias sin adiciones minerales. En términos de durabilidad se recomienda dosis tan altas como 35% de reemplazo (ACI ITG-4.2R 2006).

### **2.8.1 Características del hormigón con escoria de alto horno**

La escoria al hidratarse, reacciona con el sodio, potasio alcalino y el hidróxido de calcio ( $\text{Ca OH}_2$ ) produciendo gel C-S-H adicional. Autores demuestran que inmediatamente una pequeña reacción también se lleva a cabo cuando la escoria es mezclada con agua, preferentemente liberando calcio e iones de aluminio a la solución. La reacción se limita, sin embargo, hasta que alcalinos adicionales, hidróxido de calcio o sulfatos estén disponibles para la reacción (ACI 233R 2003).

Las investigaciones realizadas por varios científicos sugieren que la hidratación de la escoria en combinación con el cemento Pórtland a temperatura ambiente es una reacción en dos etapas. Inicialmente y durante el inicio de la hidratación, la reacción predominante es con hidróxido alcalino, pero la reacción posterior es principalmente con el hidróxido de calcio. Con el aumento de la temperatura, los hidróxidos alcalinos del cemento tienen mayor solubilidad, por lo que predominan en la estimulación de las primeras reacciones de la escoria (ACI 233R 2003).

Autores han demostrado que el hidróxido alcalino solo, es decir, sin hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento Pórtland, puede hidratar la escoria para formar una microestructura más densa, que puede ser utilizada en aplicaciones especiales tales como la estabilización de suelos y hormigones con activadores alcalinos (ACI 233R 2003).

## 2.9 Cenizas Volantes

Las cenizas volantes son un residuo finamente dividido producido en centrales termoeléctricas de carbón como un subproducto industrial de la combustión de carbón pulverizado. Las cenizas obtenidas por otros procedimientos o que tienen otros orígenes, no se consideran cenizas volantes (Fernandez Cánovas 2004).

Las cenizas volantes se componen de partículas en forma esférica con un tamaño promedio por lo general ligeramente más pequeña que la propia de cemento Pórtland de uso general. El rendimiento de las cenizas volantes en el hormigón está fuertemente influenciado por su composición química. En hormigones de 3,000 hasta 5,000 psi (21 a 34 MPa), las cenizas volantes son usadas por lo general entre el 15 a 25% (en masa) del total de material cementante. Hormigones de alta resistencia de hasta 12,000 psi (84 MPa) se han producido con éxito, utilizando cenizas volantes en la cantidad entre el 30 y el 40% del total de material cementante (ACI ITG-4.2R 2006).

Las cenizas volantes se dividen en tres clases, estas se conocen como clase N, clase F y clase C. Las cenizas volantes clase N son puzolanas naturales de origen volcánico. Las cenizas clase F son producto de la combustión de antracita o carbón bituminoso y las cenizas clase C son producto de la combustión de lignito o carbón sub bituminoso (ASTM C618 2008).

Las cenizas volantes, Clase C, que tienen propiedades hidráulicas y puzolánicas, se han encontrado ser muy útiles para hormigones de alta resistencia. Clase C, sin embargo, por lo general no es tan eficaz como la ceniza volante clase F, en cuanto a la resistencia a los ataques de sulfatos.

Tabla 2.3: Características químicas de cenizas volantes según sus clases.

CLASE	N	F	C
Dióxido de silicio + óxido de aluminio + óxido férrico, min, % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre, $\text{SO}_3$ , max, %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, max, %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por calcinación, max, %	10.0	6 <sup>A</sup>	6.0

Fuente: (ASTM C618 2008)

<sup>A</sup> Se puede emplear puzolana de Clase F con contenidos de hasta 12 % de pérdida por calcinación si cuenta con registros de rendimiento o resultados de ensayos de laboratorio aceptables.

Tabla 2.4: Características físicas de cenizas volantes según sus clases.

	CLASES		
	N	F	C
<b><i>Fineza:</i></b>			
Cantidad retenida en el tamizado por vía húmeda en la malla de 45 $\mu\text{m}$ (No. 325), máx, % <sup>A</sup>	34	34	34
<b><i>Índice de actividad resistente: <sup>A</sup></i></b>			
Con cemento Pórtland, a 7 días, min, %	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Con cemento Pórtland, a 28 días, min, %	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Demanda de agua, máx., %	115	105	105
<b><i>Estabilidad:<sup>c</sup></i></b>			
Expansión en autoclave o contracción, máx., %	0.8	0.8	0.8
<b><i>Requisitos de uniformidad:</i></b>			
La densidad y la fineza de muestras individuales no deberá variar respecto al promedio establecido por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores, si el número es menor que diez, por más de:			
Densidad, máxima variación del promedio, %	5	5	5
Porcentaje retenido en la malla de 45 $\mu\text{m}$ (No. 325), variación máxima % de puntos según el promedio	5	5	5

Fuente: (ASTM C618 2008)

<sup>A</sup> El índice resistencia con cemento Pórtland, no se considera una medida de la resistencia a la compresión del hormigón que contiene cenizas volantes o puzolanas naturales. La cantidad de cenizas volantes o puzolana natural especificado para la prueba para determinar el índice de resistencia con el cemento Pórtland, no se considera la proporción recomendada para el concreto que se utilizará en el trabajo. La cantidad óptima de cenizas volantes o puzolana natural para cualquier proyecto en específico, está determinado por las propiedades requeridas del hormigón y debe ser establecido mediante ensayos. El índice de resistencia con el cemento Pórtland es una

medida de la reactividad con un determinado cemento y está sujeto a variaciones dependiendo del lugar donde fue tomada tanto la ceniza volante o puzolana natural como el cemento.

<sup>b</sup> Al acercarse el 7 y 28 día, el índice de resistencia indicará el cumplimiento de las especificaciones.

<sup>c</sup> Si las cenizas volantes o puzolanas naturales constituyen más del 20% en masa del material cementantes, las muestras de prueba para la expansión en autoclave deberán contener el porcentaje previsto. La excesiva expansión en autoclave es altamente significativa en los casos donde el agua con relación al material de cementante es baja, por ejemplo, en las mezclas para bloques o en hormigón proyectado.

### 2.9.1 Características del hormigón con cenizas volantes

El hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ) liberado por la hidratación del cemento es soluble en agua y puede filtrarse a través del hormigón endurecido, dejando huecos por donde puede entrar el agua. A través de sus propiedades puzolánicas, las cenizas volantes se combinan químicamente con  $\text{CaOH}_2$  y agua para producir un nuevo gel, C-S-H, reduciendo así el riesgo de lixiviación de  $\text{CaOH}_2$  y densificando el material. Esta reacción de las cenizas volantes refina la estructura porosa del hormigón reduciendo la entrada de agua, permeabilidad, y los agentes agresivos que esta pueda transportar.

La actividad puzolánica consume  $\text{CaOH}_2$  lo que podría reducir el pH del hormigón y colocar el acero de refuerzo fuera de la zona de pasivación. Sin embargo, investigadores encontraron que un ambiente alcalino muy similar a la de hormigón sin cenizas volantes sigue existiendo, de tal forma que preserva la pasividad del acero de refuerzo. Además la reducción de la permeabilidad por las cenizas, disminuye el ingreso del agua, agentes agresivos y oxígeno (ACI 232.2R 2003).

Según investigadores, la incorporación de cenizas volantes modifica la microestructura del hormigón lo que resulta en cambios en su comportamiento mecánico y la durabilidad. Es conocida una pérdida de resistencia a compresión a edades tempranas y una posterior subida en la resistencia a los 91 días de curado. En términos de durabilidad resulta en reducciones

significativas en el coeficiente de difusión del ión cloruro de pasta de cemento, morteros y hormigones. En edades tempranas (28 días) la diferencia en el coeficiente de difusión de los hormigones con cenizas volantes y cemento Pórtland pueden ser poco significativa. Pero según avanza la edad, los hormigones con cenizas volantes tienen reducciones muy significativas en la difusión. (ACI 232.2R 2003).

## 2.10 Cenizas Naturales

Las puzolanas naturales son materias sólidas de naturalezas silíceas o sílico-aluminosa, capaces de combinarse con la cal hidráulica o con la procedente de la hidratación de los cementos, a temperatura ambiente y en la presencia de agua, para formar compuestos similares a los originados en la hidratación de los componentes principales del cemento Pórtland.

Estas puzolanas son de origen volcánico, como: tobas, pómez, cenizas, escorias, entre otras, o sedimentario como el *gieze* (francés) u orgánico como el Kieselgur, las tierras de diatomeas, entre otras.

La norma UNE-EN 197-1 clasifica a las puzolanas en “puzolana natural” que son normalmente material de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas (compuestas principalmente por  $\text{SiO}_2$  reactiva, esta no debe ser inferior al 25% en masa, y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; así como pequeñas cantidades de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y otros óxidos) y en “puzolana natural calcinada” que son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico y que cumplan con las condiciones que se han indicado con carácter general (Fernandez Cánovas 2004).

Según el Instituto Americano del Hormigón (ACI por sus siglas en inglés) la puzolana se define como:

"... un material silíceo o silíceos y aluminosos, que en sí mismo posee poco o ningún valor cementicio, pero en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes" (ACI 232.1R 2000).

Y la puzolana natural se define como:

"... ya sea una material natural en estado crudo o calcinado que posea propiedades puzolánicas (por ejemplo, cenizas volcánicas, pómez, lutitas, tobas, y algunas tierras de diatomeas)" (ACI 232.1R 2000).

El ASTM C618 (2008) cubre el uso de las puzolanas naturales como adiciones minerales en el hormigón. Las puzolanas naturales en el estado crudo o calcinado se designan como puzolanas de Clase N y se describen en las especificaciones como:

" Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para esta clase que figuran en ese documento, tales como un poco de tierra de diatomeas, sílex opalino y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pómez, calcinadas o sin calcinar y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras" (ASTM C618 2008).

### **2.10.1 Características del hormigón con cenizas naturales**

Al mezclar cemento Pórtland y adiciones minerales con actividad puzolánica, la reacción puzolánica avanza como una reacción ácido base de cal y álcalis con óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de la puzolana. Suceden dos eventos, en primer lugar, hay una disminución gradual en la cantidad de hidróxido de calcio libre a medida que pasa el tiempo, y en segundo lugar, durante esta reacción se produce un aumento en la formación de gel C-S-H y aluminosilicatos de calcio, que son geles similares a los productos de hidratación del cemento Pórtland (ACI 232.1R 2000).

El resultado es que la pasta de cemento endurecido contiene menos hidróxido de calcio, más C-S-H, y otros productos de baja porosidad. La investigación sobre la hidratación de cementos hechos con puzolanas naturales de origen volcánico ha indicado que el refinamiento de la estructura porosa resultante de la reacción puzolánica es importante para mejorar la durabilidad y las propiedades mecánicas.

La forma, finura, distribución de tamaño de partícula, densidad y composición de las partículas de la puzolana natural influye en las propiedades del hormigón recién mezclado y en la resistencia que desarrolla el hormigón endurecido. La mayoría de puzolanas naturales tienden a aumentar las necesidades de agua como consecuencia de las características de sus microporos y mayor área superficial (ACI 232.1R 2000).

### **2.11 Propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con adiciones minerales**

Investigadores han demostrado que la incorporación de cenizas volcánicas, escoria de alto horno y cenizas volantes modifican la microestructura del hormigón, usualmente densificando el mismo, lo cual conlleva a alteraciones de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones (Hossain and Anwar 2003; Khandaker and Anwar 2003; Binicini et al. 2007; Chalee, Ausapanit and Jaturapitakkul 2009).

En el caso de las escorias de alto horno, investigadores han demostrado que su empleo puede disminuir la penetración del ión cloruro e incrementa la resistencia a compresión. No obstante, el empleo de dosis elevadas de escorias, sin precauciones adicionales, pueden ocasionar un efecto adverso sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad del material resultante (Bouikni, Swamy and Bali 2009; Barnett et al. 2005; Topu and Bog 2010; Binicini et al. 2007).

Al hablar de las cenizas volantes, su incorporación modifica el comportamiento del hormigón en sus estados fresco y endurecido. Estas modificaciones pueden afectar las propiedades

mecánicas y la durabilidad del hormigón. Las propiedades más valoradas de los hormigones con cenizas volantes en su estado fresco son su mayor docilidad, lo que permite disminuir las relaciones agua/cemento, y la reducción de calor de hidratación por el empleo de menores dosis de cemento (Fernandez Cánovas 2004). Investigadores han demostrado que los hormigones endurecidos que emplean cenizas volantes desarrollan menores resistencias a compresión a edades tempranas, pero a largo plazo su resistencia puede ser igual o mayor que un hormigón equivalente sin cenizas. Estableciendo como límite de sustitución un 35% (Wong et al. 2000; Saraswathy and Song 2006; Ferreira, Ribeiro and Ottosen 2002; Lorenzo, Goñi and Guerrero 2003; (Chalee, Ausapanit and Jaturapitakkul 2009). La reacción puzolánicas de las cenizas volantes aumenta la formación de compuestos hidratados del cemento lo que refina su estructura porosa, ayudando a disminuir la permeabilidad del material resultante.

Investigadores destacan las ventajas en el empleo de cenizas volcánicas como sustituto del cemento (Kaid et al. 2009; Fajardo, Valdez and Pacheco 2008; Hossain and Anwar 2003; Anwar and Khandaker 2004; Hossain and Lachemi 2003; Khandaker and Anwar 2003; Lachemi and Hossain 2007). Estos emplean niveles de sustitución de entre el 5% y el 20%, resultando en hormigones con menores resistencias a compresión que su respectiva referencia. Sin embargo estos muestran mejoras en su resistencia a la difusión del ión cloruro.

Otros científicos presentan resultados utilizando combinaciones de cenizas volantes y cenizas volcánicas obteniendo como resultado una disminución del coeficiente de difusión del ión cloruro, por tanto mitigan la penetración de sales y hacen notar que el uso de cenizas volantes permite mayores resistencias a los 28 días. Las dosis empleadas para estas combinaciones se encuentran en el rango del 20% al 30% de la masa de cemento (Khandaker, Lachemi and Sahmaran 2003; Papadakis and Tsimas 2002; Ergul et al. 2003).

Al valorar el empleo de las escorias de alto horno y las cenizas volantes en el hormigón, investigadores han observado que en términos de resistencia a compresión las escorias de alto horno obtienen mejores resultados a los 28 días de curado. Muestran que en la combinación de ambas no genera resultados tan buenos como cada una individual. Establecen que la escoria obtiene mayor resistencia a la penetración del ion cloruro que las cenizas volantes para un 50 % de sustitución (Vedalakshmi, Rajagopal and Palaniswamy 2006; Berndt 2009).

## **CAPÍTULO 3**

### **CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Introducción**

En el apartado 3.2 de este capítulo se describen los materiales elegidos para la dosificación y fabricación del hormigón, así como sus características particulares. En el caso de los cementos y las adiciones se presentan los resultados de los análisis químicos y físicos, y para los áridos los resultados finales de sus análisis granulométricos. En el apartado 3.3 y 3.4 se describen las dosificaciones y probetas empleadas respectivamente. El apartado 3.5 explica los procedimientos experimentales empleados en la ejecución de los diferentes ensayos.

#### **3.2 Materiales**

Los materiales utilizados en esta investigación están disponibles para su uso comercial en el mercado local de Puerto Rico. El cemento utilizado en esta investigación es Pórtland Tipo I, de acuerdo con la norma ASTM C150. El cemento fue provisto por Essroc San Juan en Dorado, Puerto Rico. Las adiciones empleadas son escoria, cenizas volantes y cenizas volcánicas de la

isla de Montserrat. Las características de estas mezclas se muestran en la Tabla 3.1. La tabla muestra que las cenizas volantes pueden ser clasificadas como Tipo F de acuerdo con el ASTM C618 (2008), las cenizas volcánicas pueden ser clasificadas como Tipo N de acuerdo a la misma norma y como puzolanas con características similares a las Rhenish trass de acuerdo al ACI 232.1R (2000). Las escorias de alto horno pueden clasificarse como *granulated blast-furnace slag* (GBFS) o escorias provenientes de material granular vitrificado, finamente molido, luego de que la escoria a altas temperaturas es rápidamente enfriado en una inmersión en agua, esto de acuerdo con el ACI 233R (2003).

Tabla 3.1: Composición química, mineralógica y propiedades físicas del cemento y adiciones

<b>Compuestos</b>	<b>Cemento</b>	<b>Escoria</b>	<b>Cenizas Volantes</b>	<b>Cenizas Volcánicas</b>	<b>Unit</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20.4	33.81	55.32	53.6	%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.9	13.7	29.22	16.91	%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.2	0.86	3.89	8.98	%
<b>CaO</b>	64.8	44.34	6.15	12.39	%
<b>MgO</b>	1.6	5.65	0.68	3.26	%
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.8	0.16	negative	negative	%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.14	0.18	0.31	3.18	%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.53	0.34	2.34	0.72	%
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.3	0.64	1.68	0.7	%
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.03	0.02	0.14	0.14	%
<b>C<sub>3</sub>S</b>	56	-	-	-	NONE
<b>C<sub>3</sub>A</b>	10.2	-	-	-	NONE
<b>LSF</b>	94.8	39.807	3.206	7.042	NONE
<b>Silica Ratio</b>	2.2	2.323	1.671	2.07	NONE
<b>Aluminium Ratio</b>	1.829	15.923	7.513	1.883	NONE
<b>Blaine</b>	432	579	464	567	NONE
<b>Fineness 325 μm</b>	92.3	85.4	84.5	87.8	NONE
<b>LOI</b>	2.4	1.12	1.28	0.52	NONE

Fuente: Laboratorios Essroc San Juan

Los agregados gruesos empleados son de naturaleza silícea y de la misma fuente de procedencia. El diámetro máximo de los mismos es de 20 mm y proceden de trituración. Los

agregados finos son de naturaleza caliza y poseían un modulo de finura de 3.10. Los análisis granulométricos de los áridos se realizaron conforme a la norma ASTM C33 (2008).



a)



b)

Figura 3.1: a) X-Ray Fluorescence Spectrometry, prueba analítica no destructiva para identificar y determinar las concentraciones de elementos presentes en el cemento y adiciones, b) Humboldt MGF, equipo utilizado para medir las finezas de los materiales cementantes.

### 3.3 Dosificación

La dosificación de las amasadas se realizó por el método del *American Concrete Institute* (ACI) (ACI 211.1 1991). Se empleó 330 kg de cemento por  $m^3$  de hormigón y la relación agua/conglomerante se mantuvo en 0.45. En las dosificaciones del hormigón con adición de cenizas volantes se siguieron parámetros y recomendaciones del ACI 232.2R (2003), para las cenizas volcánicas se utilizó ACI 232.1R (2000) y para la escoria siguió las recomendaciones del ACI 233R (2003). Se utilizó un reductor de agua de alto rango proveniente de la compañía Grace Construction Products, Adva 190, en un 1.8% del total de material cementante. El plan de trabajo consiste en mezclas con una adición mineral y mezclas con dos adiciones minerales.

La Tabla 3.2 presenta las cantidades empleadas de cada material en las respectivas dosificaciones.

Tabla 3.2: Dosificaciones por metro cúbico de hormigón.

Conglomerante	PC (kg)	FA (kg)	SLAG (kg)	VA (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)
<b>REF(100%)</b>	330	-	-	-	141	20	996	885
<b>1 adición</b>								
<b>PC75-FA25</b>	247	82	-	-	141	20	971	885
<b>PC75-SLAG25</b>	247	-	82	-	141	20	991	885
<b>PC87.5-VA12.5</b>	288	-	-	41	141	20	992	885
<b>2 adiciones</b>								
<b>PC75-FA12.5-SLAG12.5</b>	247	41	41	-	141	20	981	885
<b>PC75-FA12.5-VA12.5</b>	247	41	-	41	141	20	980	885
<b>PC75-SLAG12.5-VA12.5</b>	247	-	41	41	141	20	990	885

**Fuente: Elaboración propia**

PC: Cemento Pórtland, Tipo I

FA: Cenizas Volantes, Tipo F

SLAG: Escoria de Alto Horno

VA: Cenizas Volcánicas, Isla de Monserrat

### 3.4 Fabricación de las probetas de hormigón

El hormigón se amasó en una mezcladora de tambor basculante con capacidad para 5 pies cúbicos (0.143m<sup>3</sup>). Las mezclas se elaboraron en amasadas de 0.033 m<sup>3</sup> aproximadamente, obteniéndose de cada una 18 probetas cilíndricas de 10 cm (4 pulgadas) de diámetro por 20 cm (8 pulgadas) de altura. El proceso de amasado y curado siguió las recomendaciones del ASTM C192 (2007).



Figura 3.2: Hormigonera

### 3.5 Procedimiento experimental

Los análisis realizados para caracterizar el material fueron los siguientes: para las propiedades mecánicas, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, para durabilidad, se realizaron pruebas de penetración del ión cloruro y para caracterizar sus propiedades físicas, se completó pruebas de porosimetría por intrusión de mercurio.

La Tabla 3.3 resume los ensayos realizados y las edades seleccionadas para su ejecución, así como la normativa seguida para su realización.

Tabla 3.3: Ensayos realizados

Ensayos	Tiempo (días)				Normas
	7	28	91	180	
Resistencia a compresión	x	x	x	x	ASTM C39/C 39M
Indicador eléctrico de la habilidad del Hormigón en resistir la Penetración del Ion Cloruro				x	ASTM C1202
Porosimetría por Intrusión de Mercurio*				x	ASTM D4404

**\*Ensayo modificado**

#### 3.5.1 Propiedades mecánicas: determinación de la resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión se llevó a cabo a los 7, 28, 91 y 180 días de curado. Los ensayos siguieron las directrices de la normativa ASTM C39 (2005). Las probetas que se emplearon fueron cilíndricas de 100 Ø × 200 mm (4 in x 8 in).

La máquina de ensayos contaba con dos platos de compresión, uno interior adosado al bastidor, y otro superior, acoplado al pistón de la máquina mediante una rótula engrasada de asiento esférico, lo que garantizó en todo momento que la compresión se realizara de una manera centrada. Al colocar la probeta se aplicaba una ligera precarga del 10% de la carga máxima de ensayo, hasta que éste quedara uniformemente apoyado en la cara superior de la probeta.

En la Figuras 3.3 se muestra la secuencia de uno de los ensayos de resistencia a compresión que se realizaron como parte del proyecto. La prensa utilizada en todos los casos tiene una capacidad máxima de 300,000 kg en compresión.

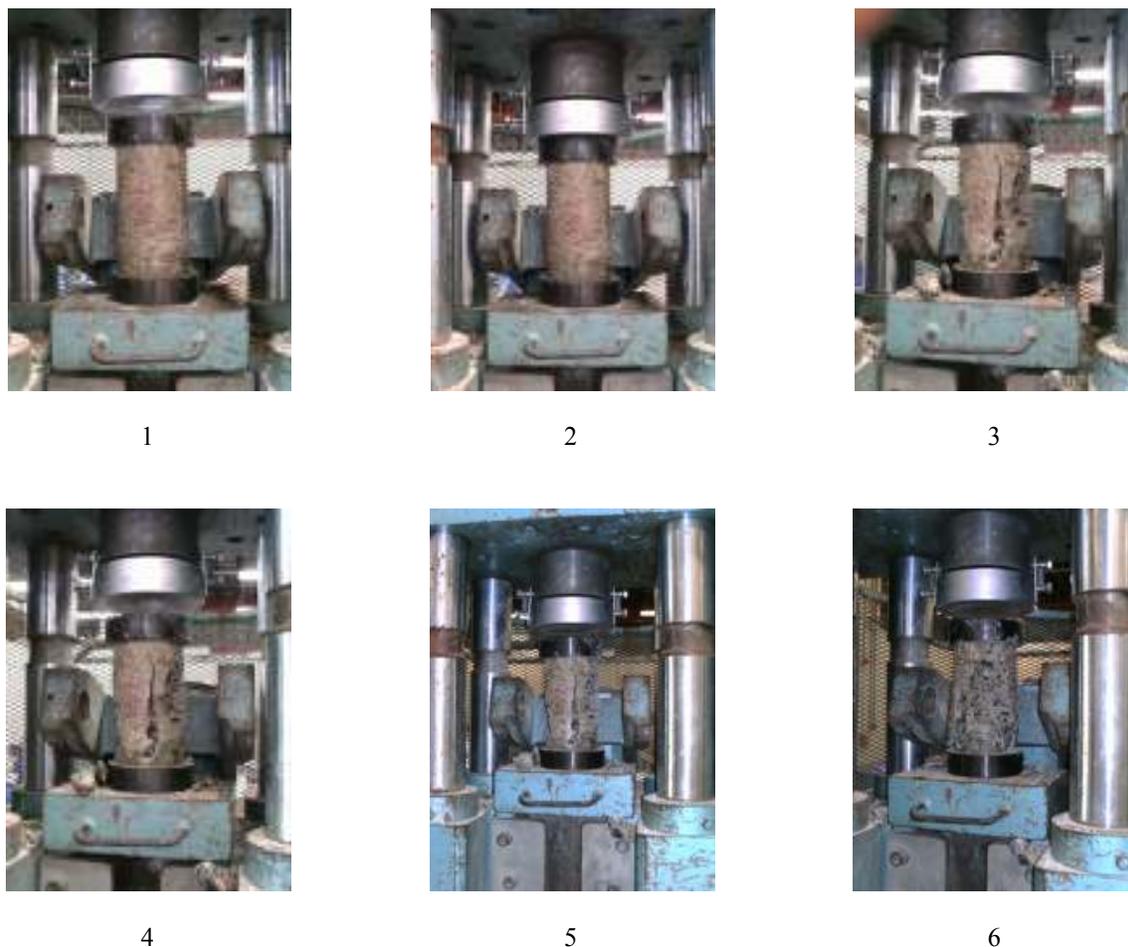


Figura 3.3: Secuencia del ensayo mecánico: Resistencia a Compresión

### 3.5.2 Propiedades físico-químicas: estructura porosa

Existen distintas técnicas para la caracterización de la estructura porosa de los materiales base cemento. Su elección se hace en función del rango de poros a estudiar. Así mismo, se podrían agrupar por su capacidad de medida según el tipo de poros, las que solo tienen acceso a poros

interconectados (métodos de penetración y adsorción) y las que tiene acceso a todos los poros (métodos que utilizan radiación).

Los métodos utilizados para determinar la estructura porosa se pueden agrupar como directos e indirectos. En los directos se agrupan los siguientes métodos: microscopía óptica, escáner por microscopía electrónica y el análisis de imágenes. Los indirectos incluyen las siguientes técnicas; porosimetría por intrusión de mercurio, adsorción de gas, método de desplazamientos, termoporosimetría y resonancia magnética nuclear, entre otros.

### 3.5.2.1 Porosimetría por intrusión de mercurio

La porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés) fue aplicada a los materiales base cemento por Edel'man, L. en 1961 (Edel'man L.I. 1961). La MIP asume que los poros son cilíndricos, una condición que nunca se satisface en los materiales base cemento. Esto provoca una medida característica y no real de la estructura porosa. Sin embargo, la técnica es ampliamente utilizada porque a diferencia de otros métodos, puede medir un amplio rango de tamaño de poros, desde los 2.5 nm hasta los 100  $\mu\text{m}$ .

La alta tensión superficial del mercurio se debe a su que su ángulo de contacto es mayor de 90 grados, concediéndole la propiedad de no mojar la mayoría de los sólidos. Esto implica que el mercurio, a presión atmosférica, no penetre en los poros de los materiales inmersos en el mismo sin una fuerza externa que lo impulse.

Existe una relación entre la presión de mercurio aplicada y el tamaño de poro en el que penetra, dada por la ecuación de Washburn, ecuación 3.1 (Washburn 1921):

$$p = \frac{-4\gamma \cos \theta}{d} \quad 3.1$$

donde:

$\gamma$  tensión superficial (N/nm)

$\theta$  ángulo de contacto

$d$  diámetro de poro (nm)

$p$  presión necesaria para que el Hg penetre un poro de diámetro  $d$  (N/nm<sup>2</sup>)

Los resultados de la MIP han sido relacionados por numerosos investigadores con los parámetros que controlan la permeabilidad de fluidos y la difusión de iones en el hormigón (Roy 1989). Del mismo modo, los críticos de la técnica reclaman que los resultados de la misma se ven alterados por el tamaño de la muestra, el pre-tratamiento que se aplique, la posibilidad de rotura de la red porosa y el efecto de cuello de botella en los poros que puede provocar una adjudicación errónea de la distribución. Sin embargo, la mayoría coincide en que la técnica es útil para medir el diámetro umbral y el volumen de poros de modo comparativo (Diamond 2000).

La caracterización de la estructura porosa del material por la MIP proporciona información sobre de la porosidad total y la distribución e interconexión de los poros. La porosidad total es el volumen total de poros respecto al volumen total del material (ecuación 3.2). En la MIP el cómputo está limitado a los poros conectados. Despreciando el volumen de los agregados en el hormigón, la porosidad total del hormigón en estado fresco oscila entre el 20% - 25%, y al endurecerse varía entre el 10% y el 15%. En hormigones convencionales la porosidad no baja del 10% (Diamon 1989).

$$P_t = \frac{V_p}{V_m} (100) \quad 3.2$$

donde:

$P_t$  Porosidad total (%)

$V_p$  Volumen de poros (mm<sup>3</sup>)

$V_m$  Volumen del material (mm<sup>3</sup>)

De las curvas de distribución se obtienen dos parámetros básicos: el diámetro crítico de poros ( $d_{cr}$ ) y el diámetro umbral de poros ( $d_u$ ). El diámetro crítico es el tamaño de poro interconectado que más se repite de forma continua y corresponde a la pendiente máxima de la curva de porosidad acumulada. Mientras, que el diámetro umbral es el tamaño de poro más grande donde un volumen significativo de intrusión puede ser detectado y corresponde al primer aumento de intrusión apreciable en la curva del logaritmo de la intrusión diferencial.

La estructura de poros se clasificó según la distribución de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés). Donde, se fijan los siguientes rangos: microporos ( $\emptyset < 2$  nm), mesoporos ( $2$  nm  $< \emptyset < 50$  nm) y macro-poros ( $\emptyset > 50$  nm).

### 3.5.2.2 Equipo y acondicionamiento de muestra

En este trabajo se empleó un equipo de MIP de la casa 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  $\mu$ m. Las probetas fueron curadas durante 180 días. La metodología empleada para los análisis es similar a las directrices de la norma ASTM D4404 2004.

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 el uso de un taladro de columna se extrajeron los pequeños cilindros y luego 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 cilíndrica 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 el acondicionamiento de la muestra, se coloca la misma en el penetrómetro. La intrusión de mercurio fue gradual y el 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, tanto en el llenado como en el vaciado de los poros.



a)



b)



c)

Figura 3.4: a) porosímetro, b) muestra colocada en el penetrómetro, c) penetrómetro con la muestra relleno de mercurio en la cámara de alta presión

### 3.5.3 Mecanismo de transporte: Penetración del ión cloruro

Este método de ensayo consiste en la medición de la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de una rebanada de 2 pulgadas (51 mm) correspondiente a un cilindro de 4 in (102 mm) de diámetro nominal. Una diferencia potencial de 60 V se mantiene en los extremos de la muestra, donde uno de los cuales se encuentra inmerso en una solución de cloruro de sodio, y el otro en

un hidróxido de sodio. La carga total que pasa, en culombios, está relacionado con la resistencia de la muestras a la penetración de los iones de cloruro.

### 3.5.3.1 Equipo y acondicionamiento de muestra

Los ensayos para determinar la Resistencia Penetración del Ión Cloruro en el hormigón, se efectuaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C1202 (2009). Las probetas fueron curadas durante 180 días. La obtención de la muestra siguió un proceso en el que se elimina el agua en exceso y luego se transfiere a un embase sellado, donde la muestra se mantendrá con una humedad relativa de 95% o más. Se coloca y ajusta el espécimen en las dos celdas de montaje, para evitar filtraciones de las soluciones a verter en cada celda, se utiliza un arandela de goma. Se aplica el impermeabilizante en la cara expuesta del espécimen para evitar la humedad durante el proceso y asegurar el flujo en una sola dirección. Luego hay que permitir el curado del producto según instrucciones del fabricante. Estos mismos pasos se repiten para el otro espécimen (2 in aproximadamente) de la misma probeta.

Se llena el lado de la celda que contiene la superficie superior de la muestra con 3.0% de NaCl. Esa parte de la celda se conecta al terminal negativo de la fuente de alimentación, se llena el otro lado de la celda (que estará conectado el terminal positivo de la fuente de alimentación) con una solución salina 0.3N NaOH. Los cables se conectan al puerto correspondiente de la fuente de alimentación de corriente eléctrica, una vez encendida se establece en  $60.0 \pm 0.1$  V, y se registra la lectura de corriente inicial.

Las temperaturas del espécimen deberán ser 68 a 77 ° F (20 a 25 ° C) al momento de iniciarla. Se deben medir los valores de corriente por lo menos cada 30 minutos como mínimo, para esta prueba se utilizó el programa *Proove it, Rapid Chloride Permeability Test, Germann Instruments* el cual provee un sistema de recolección de datos.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 3.5: Ensayo Prueba Rápida de Penetración Ion Cloruro a) Corte (Rebanada de 2'' arriba y abajo) de los dos especímenes por muestra, b) Impermeabilización superficie expuesta, c) Celdas donde se colocan los especímenes, d) Vacuum, máquina para vacío, e) Solución NaCl en celdas, f) Celdas, fuente de alimentación, medidor de corriente y computador para las pruebas

## **CAPÍTULO 4**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 Introducción**

Este capítulo incluye los resultados de los ensayos planteados en el capítulo anterior. El apartado 4.2 presenta los resultados del ensayo de resistencia a compresión empleados en la determinación de la propiedad mecánica del hormigón. El apartado 4.3 muestra los resultados de la penetración del ión cloruro. El apartado 4.4 muestra la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a la penetración del ión cloruro. En el apartado 4.5 se discuten los resultados obtenidos por la prueba de porosimetría por intrusión de mercurio para evaluar las características físico-químicas del material. En los apartados 4.6 a la 4.11 se presenta la relación entre el diámetro umbral y crítico respecto a la resistencia a compresión, porosidad total, e ión cloruro. El apartado 4.12 presenta la relación entre los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio. En el apartados 4.13, se discuten la relación entre el ensayo porosimetría por intrusión de mercurio y la resistencia a la penetración del ión cloruro.

El apartado 4.14 presenta y discute la valoración estadística de los resultados obtenidos usando la técnica de análisis de varianza, donde el apartado 4.14.1.1 y 4.14.1.2 discute los resultados de las propiedades mecánicas y del mecanismo de permeabilidad ión cloruro, respectivamente.

## 4.2 Resistencia a compresión

Las Figuras 4.1 a 4.7 muestran los resultados del ensayo de resistencia a compresión para cada amasada de hormigón, según los diferentes tipos de combinación de adiciones minerales empleadas (ASTM C39 2005). La Figura 4.8 muestra el valor promedio de la resistencia a compresión de todos los hormigones para las edades de 7, 28, 91 y 180 días.

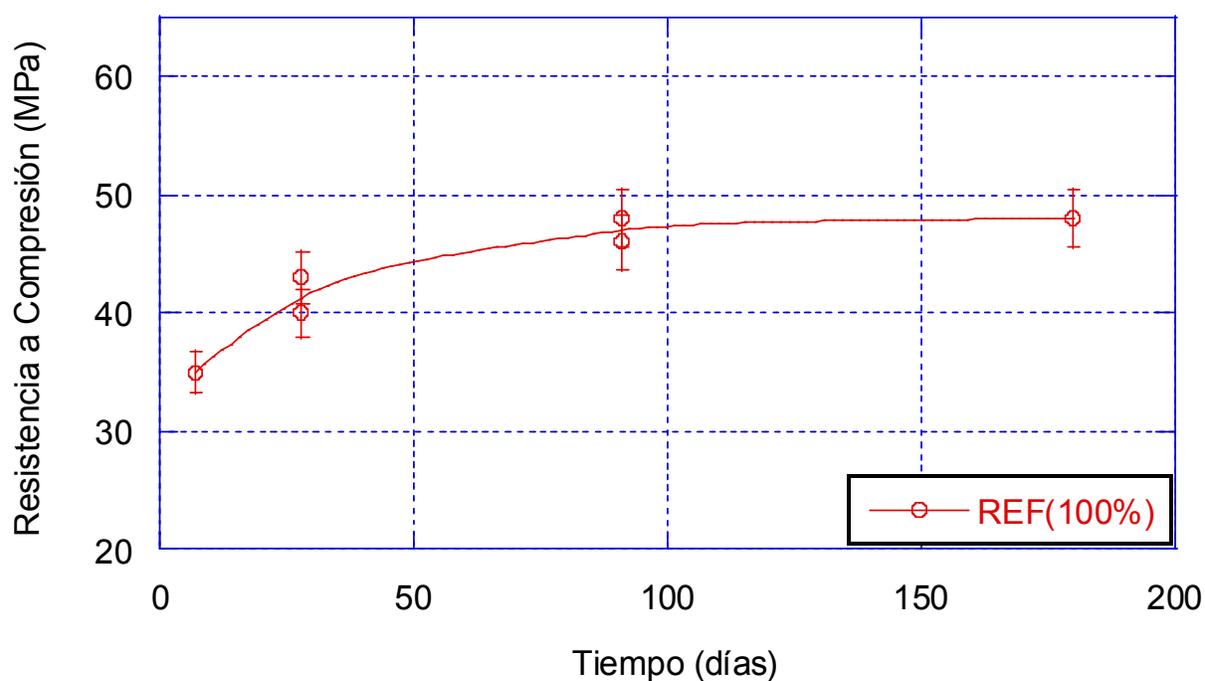


Figura 4.1: Resistencia a compresión del hormigón de referencia REF (100%)

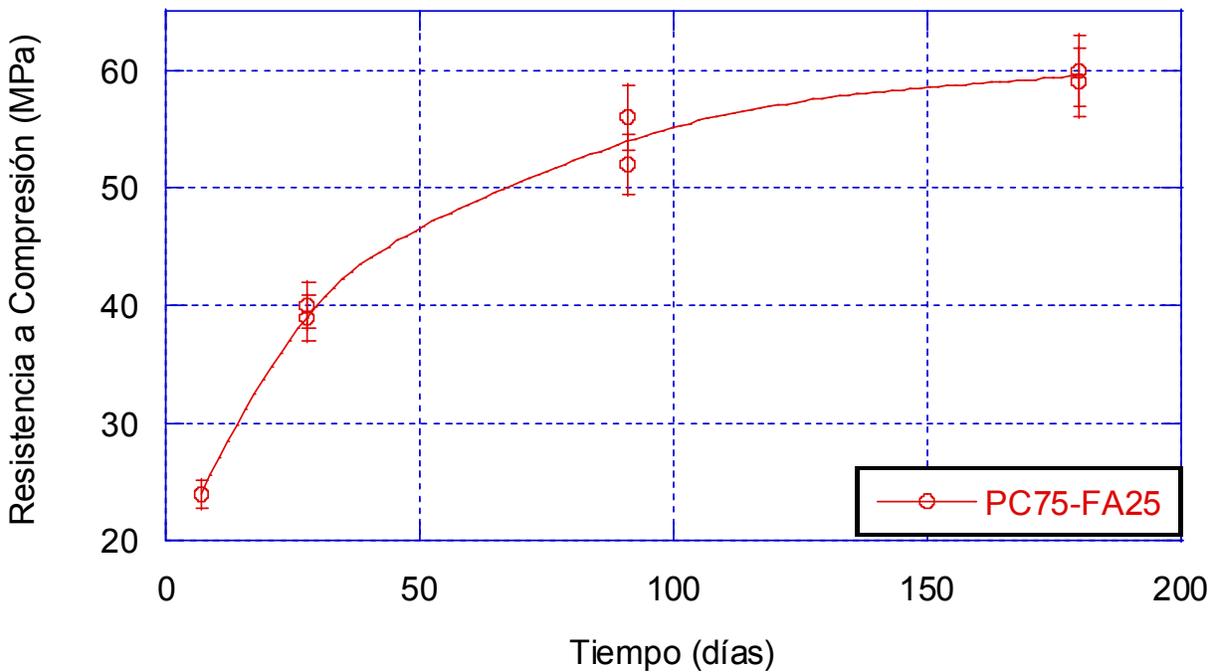


Figura 4.2: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA25

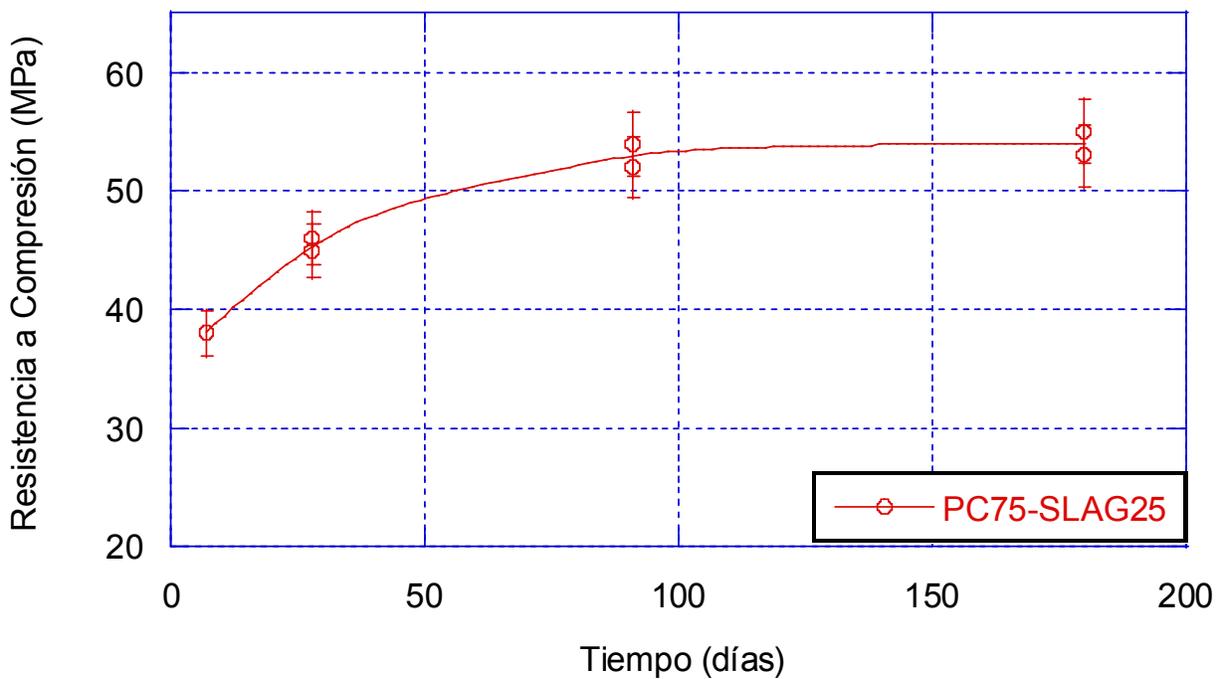


Figura 4.3: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-SLAG25

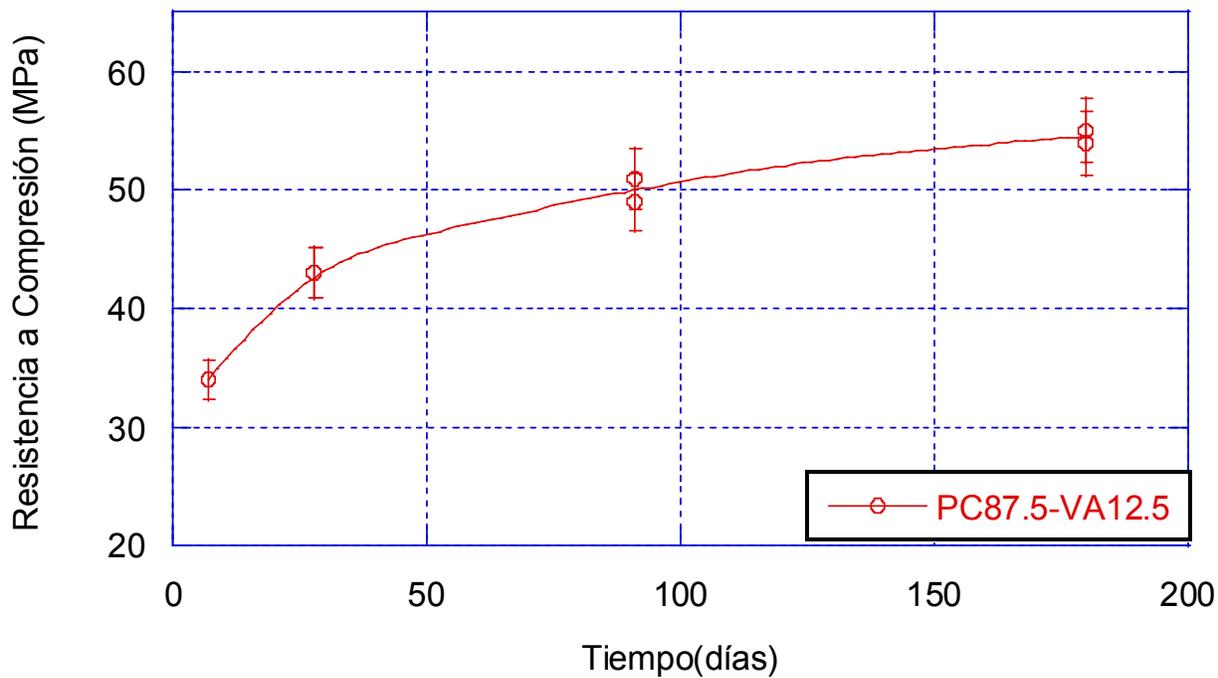


Figura 4.4: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC87.5-VA12.5

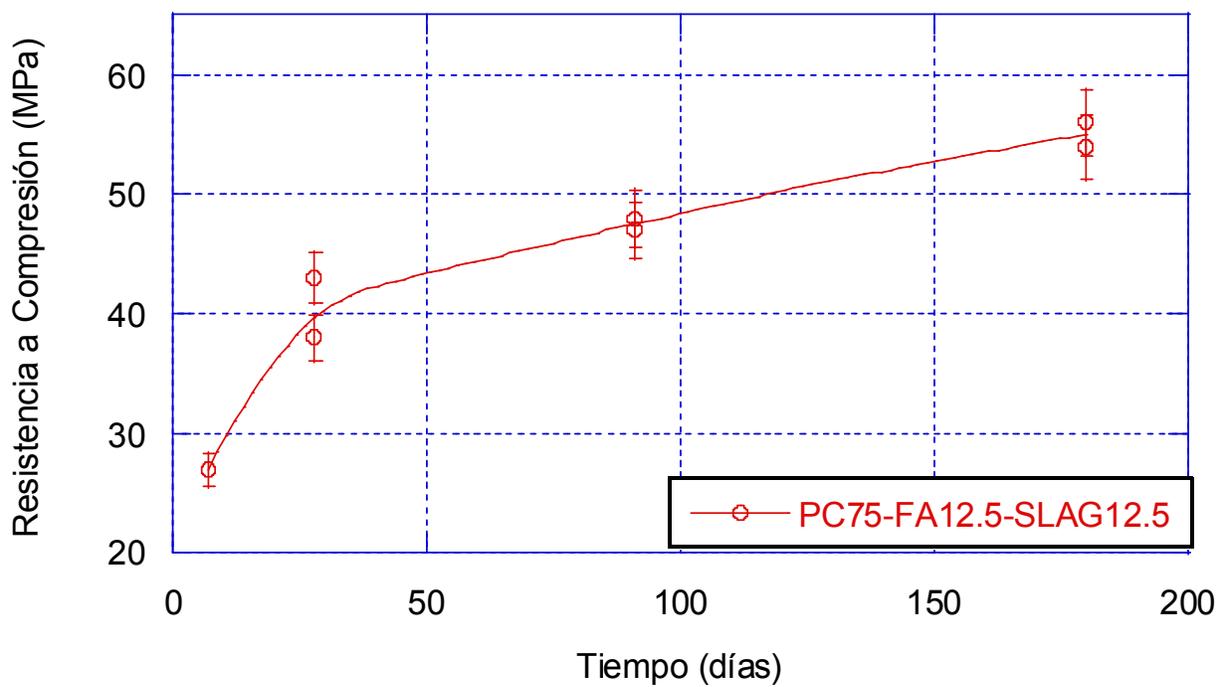


Figura 4.5: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA12.5-SLAG12.5

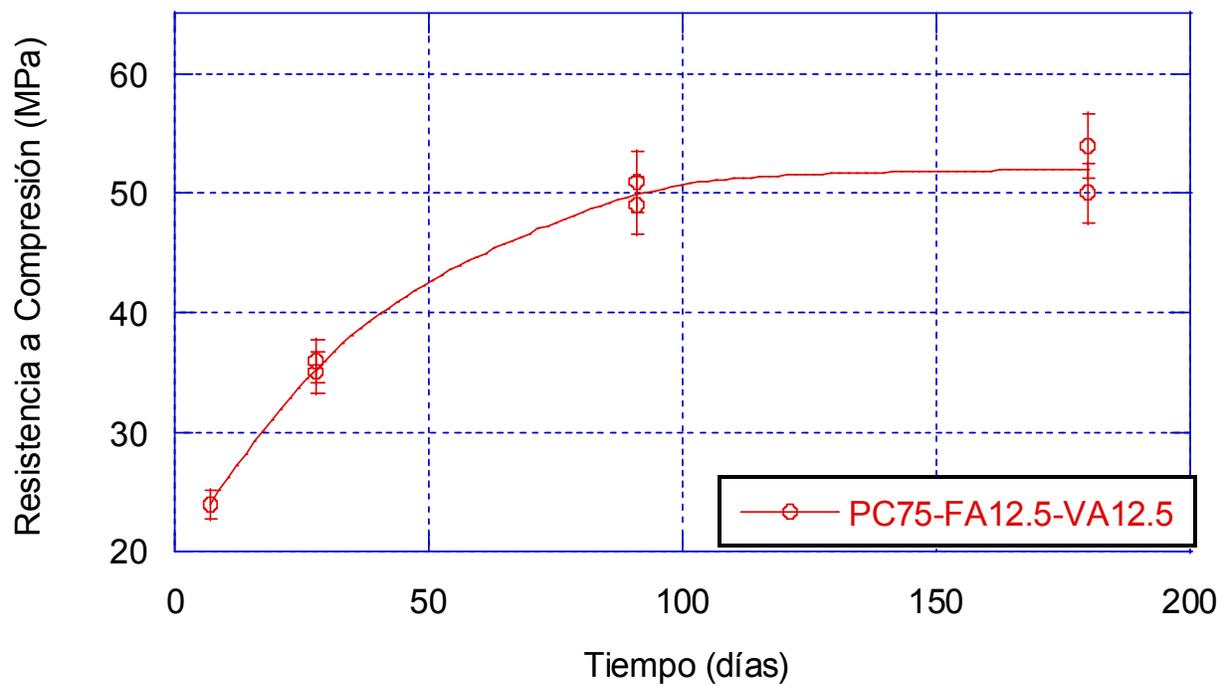


Figura 4.6: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-FA12.5-VA12.5

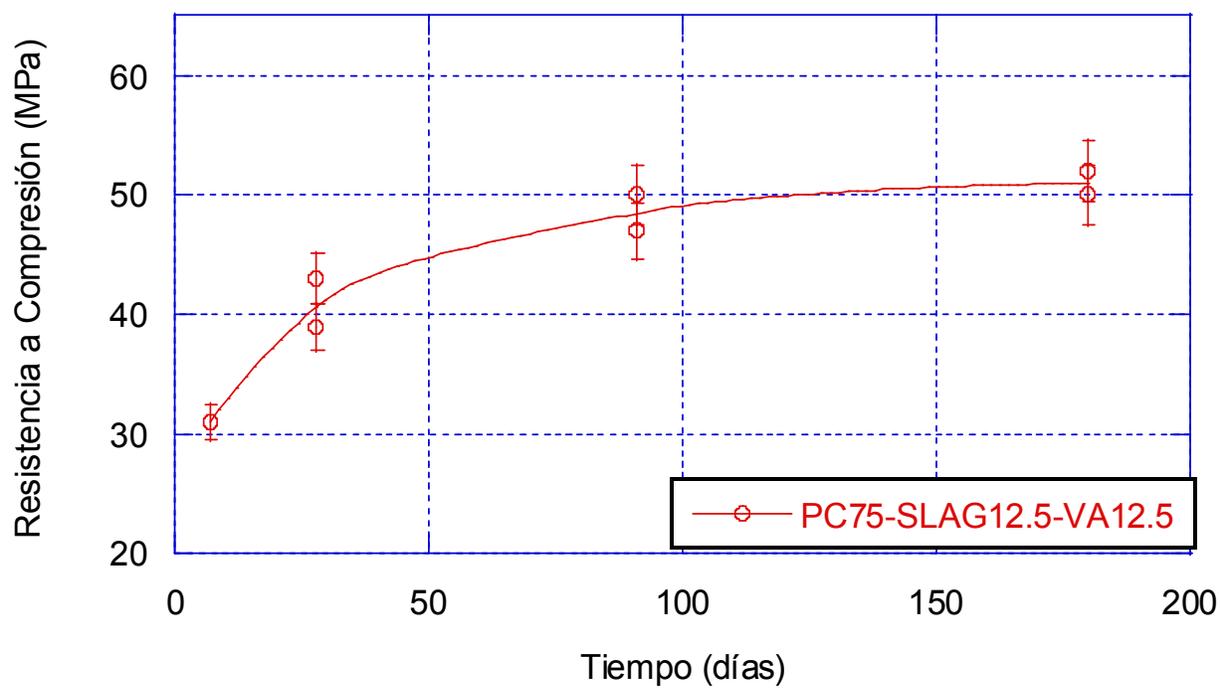


Figura 4.7: Resistencia a compresión del hormigón denominado PC75-SLAG12.5-VA12.5

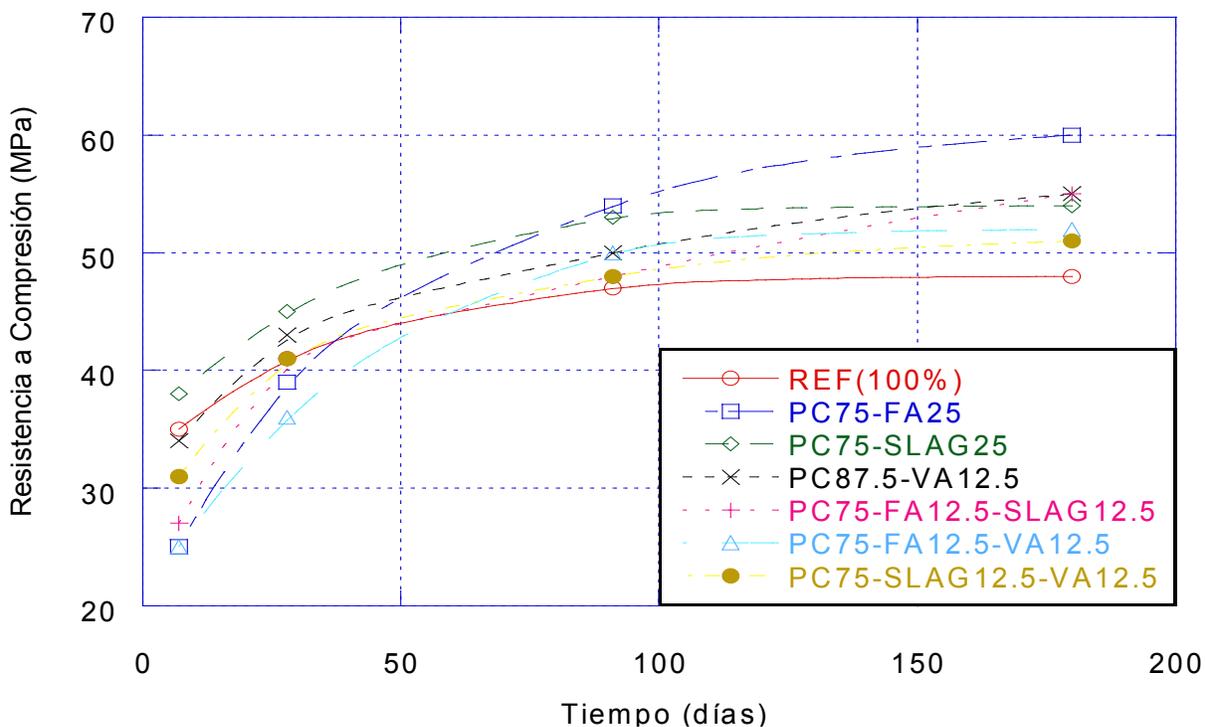


Figura 4.8: Comparación de resistencia a compresión media de todos los hormigones estudiados

La Figura 4.1 muestra la resistencia a compresión del hormigón de referencia y su evolución a través del tiempo. Se observa alta resistencia inicial, pero a partir de los 91 días los valores de resistencia no aumentan significativamente. De acuerdo a las Figuras 4.2, 4.3 y 4.8, el hormigón PC75-SLAG25 muestra los mejores resultados a edades tempranas, 7 y 28 días. Sin embargo, el hormigón PC75-FA25 muestra los mejores resultados a medio plazo, 91 y 180 días. Al comparar las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 con el hormigón de referencia, se observa que todas las mezclas experimentales superan los valores de resistencia a la compresión del hormigón de referencia después de 91 días de curado.

### 4.3 Resistencia a penetración ión cloruro

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad rápida de iones de cloruro (ASTM C1202 2009) (RCPT por sus siglas en inglés) para cada mezcla de hormigón,

de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden a la carga eléctrica que pasa a través de las probetas de hormigón empleadas. La prueba se realizó a los 180 días de curado. La tabla muestra el valor obtenido de cada probeta y un valor promedio de todas las probetas. La sección de la probeta ensayada fue etiquetada como por su localización, *Superior* e *Inferior*.

Tabla 4.1: Penetración Ión Cloruro basado en la carga que pasa, 180 días de curado.

Mezcla	Probeta 1 Carga que pasa (coulombs)		Probeta 2 Carga que pasa (coulombs)		Promedio de Carga pasando (coulombs)	Penetración Ión Cloruro (ASTM C1202)
	Superior	Inferior	Superior	Inferior		
REF (100%)	2532	2372	2391	1255	2432	Moderado
PC75-FA25	540	481	765	490	569	Muy baja
PC75-SLAG25	1751	1348	2098	1357	1639	Baja
PC87.5-VA12.5	2264	2257	2170	1777	2230	Moderado
PC75-FA12.5-SLAG12.5	804	848	883	730	816	Muy baja
PC75-FA12.5-VA12.5	933	1281	914	887	1004	Muy baja
PC75-SLAG12.5-VA12.5	1587	893	1637	1286	1351	Baja

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.1 muestra que la carga media pasada en todas las mezclas experimentales son menores que en el hormigón de referencia. Además, destaca que las mezclas que emplean cenizas volantes obtuvieron la mejor clasificación que otorga la prueba.

#### 4.4 Resistencia a compresión y resistencia a penetración ión cloruro

La Figura 4.9 muestra los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a compresión y la RCPT para cada amasada de hormigón, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales empleadas. Los valores presentados corresponden a las resistencias medias de las probetas ensayadas. La prueba se realizó después de 180 días de curado.

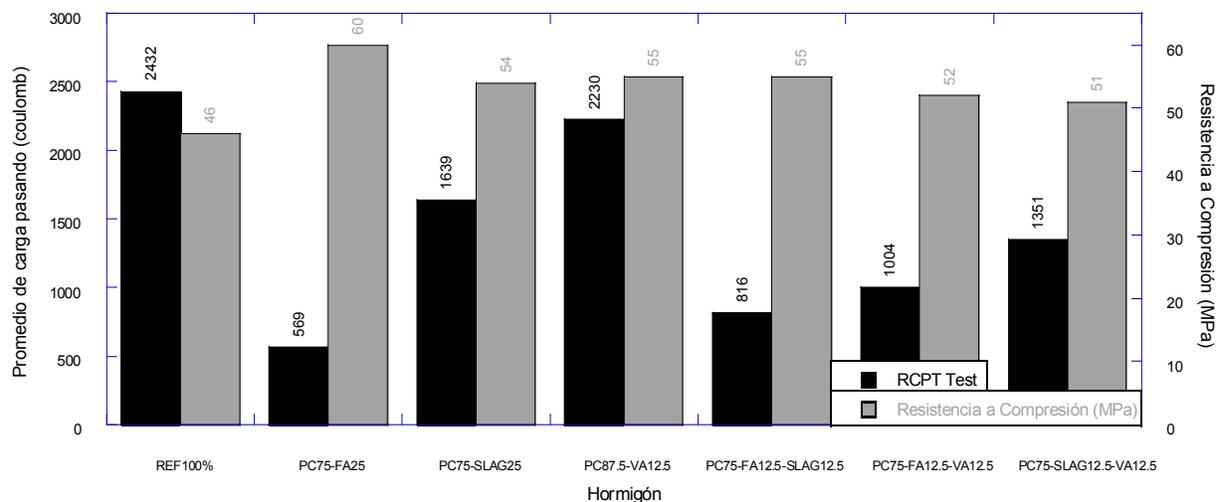


Figura 4.9: Penetración ión cloruro basada en la carga pasando y la resistencia a compresión

El hormigón PC75-FA25 presenta una baja permeabilidad al ión cloruro y presenta el valor más alto de resistencia a la compresión. Sin embargo, el hormigón PC87.5-VA12.5 muestra una alta permeabilidad al ión cloruro y presenta uno de los más altos valores a compresión.

#### 4.5 Porosimetría por intrusión de mercurio

Las Figuras 4.10 a 4.16 muestran los resultados de los volúmenes de intrusión de mercurio acumulado para cada hormigón estudiado, con distinto tipo de adición mineral y dosificación a los 180 días de curado. Los valores corresponden a las intrusiones medias de las probetas.

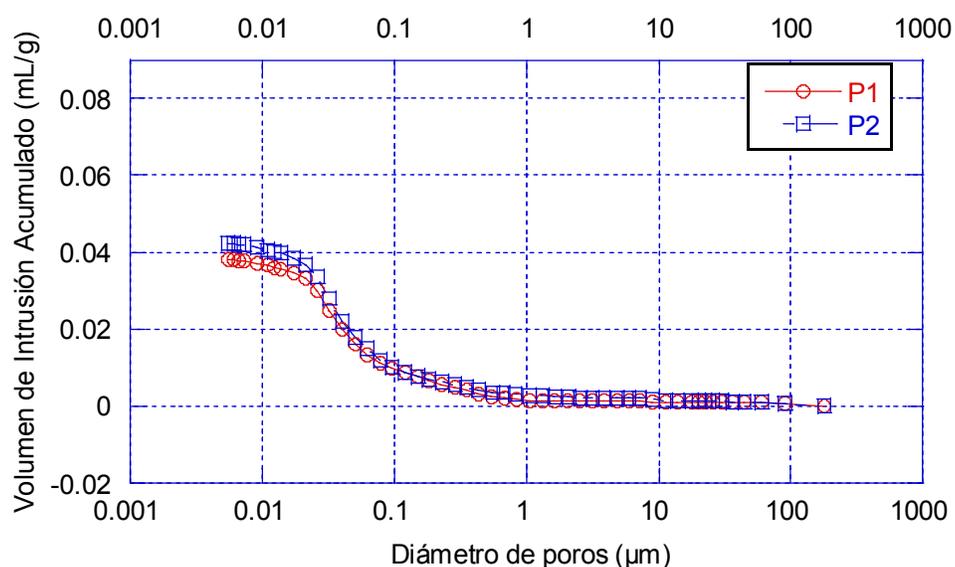


Figura 4.10: Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado REF(100%)

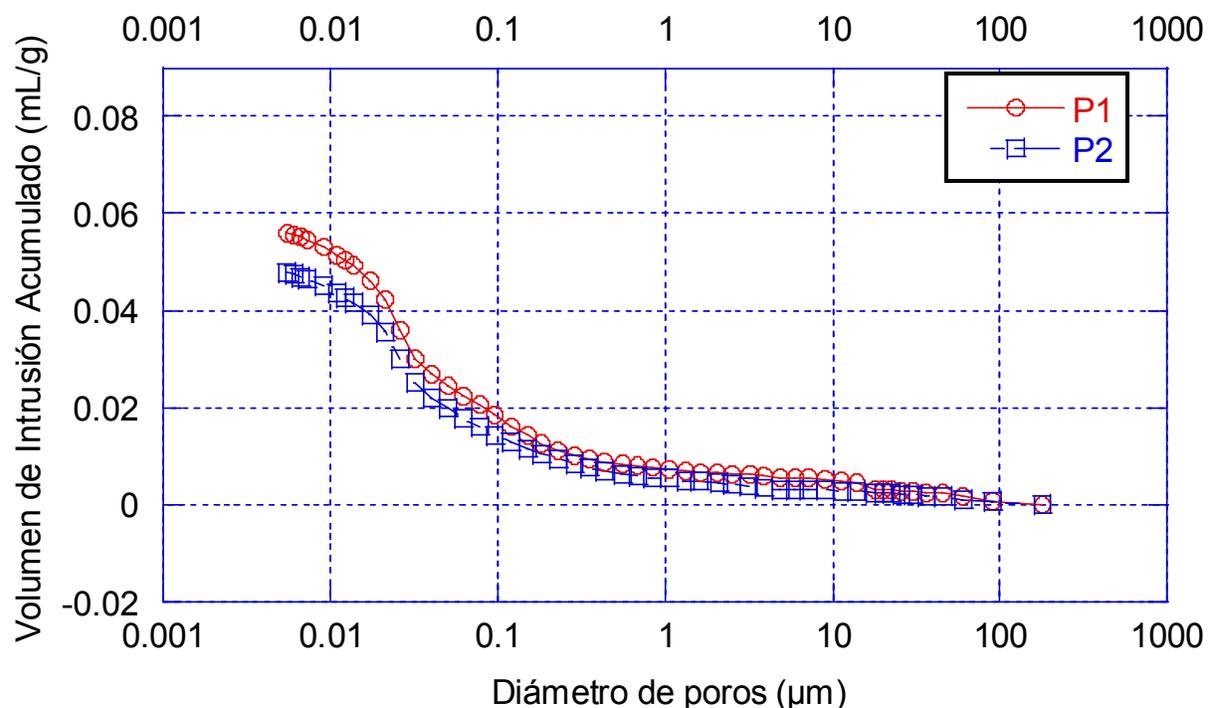


Figura 4.11: Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-FA25

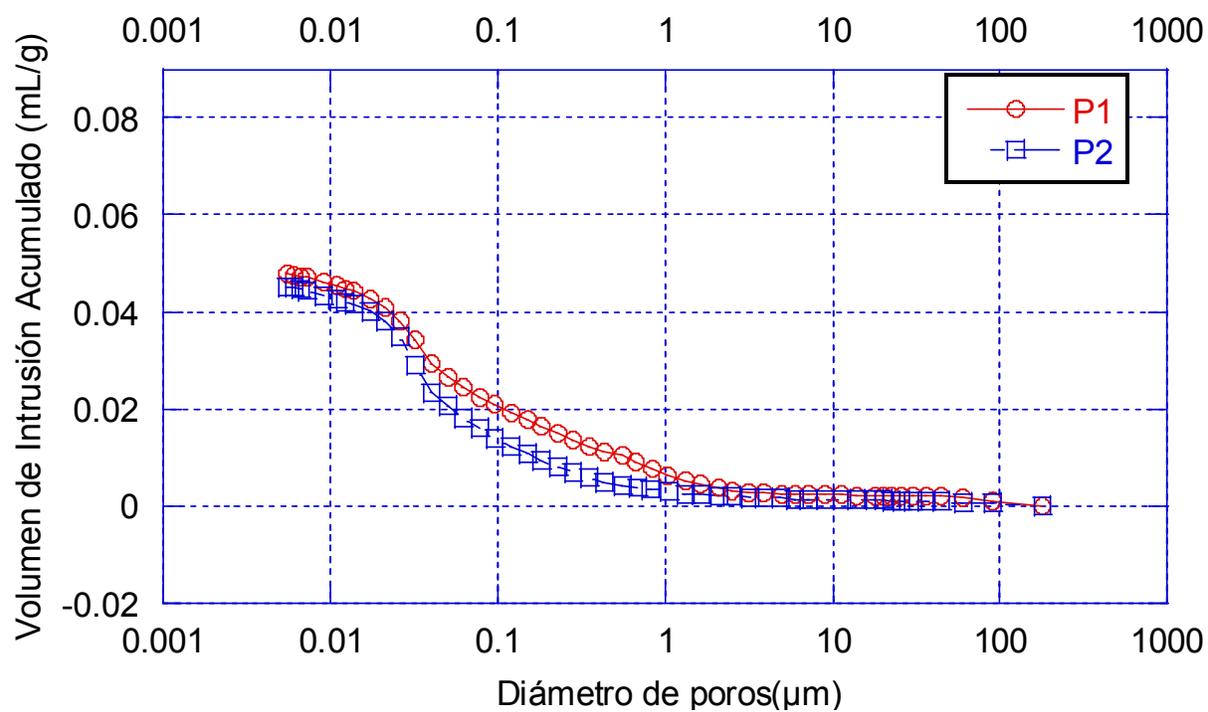


Figura 4.12: Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-SLAG25

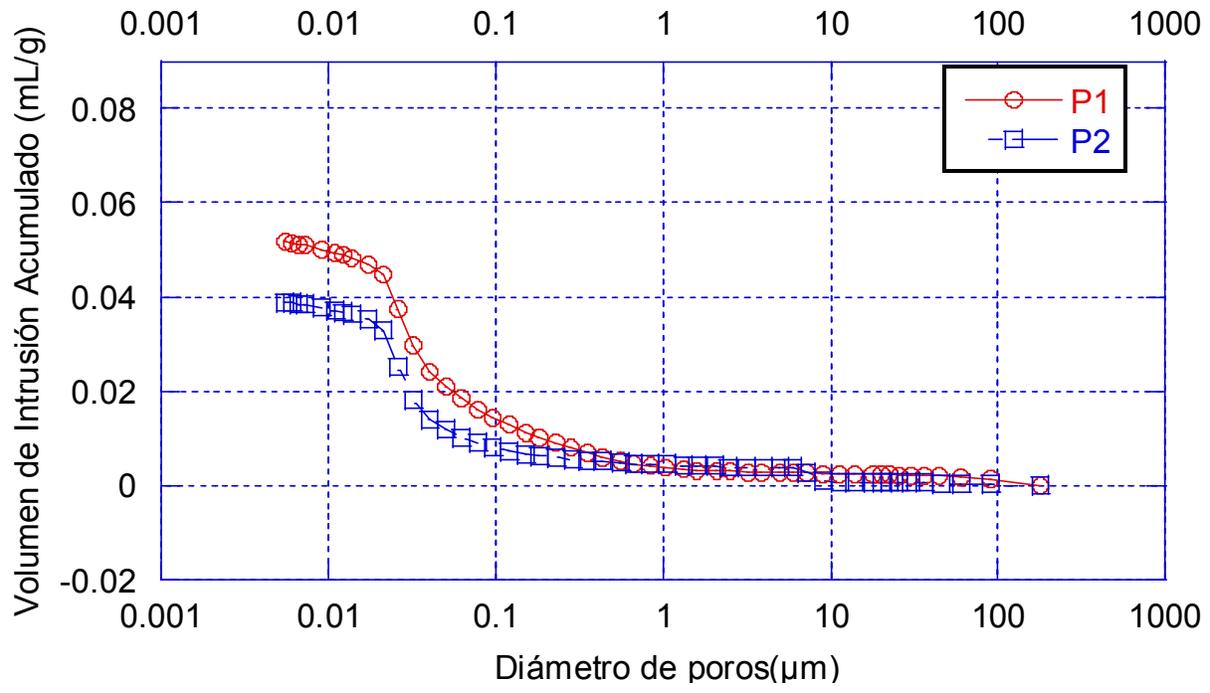


Figura 4.13: Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC87.5-VA12.5

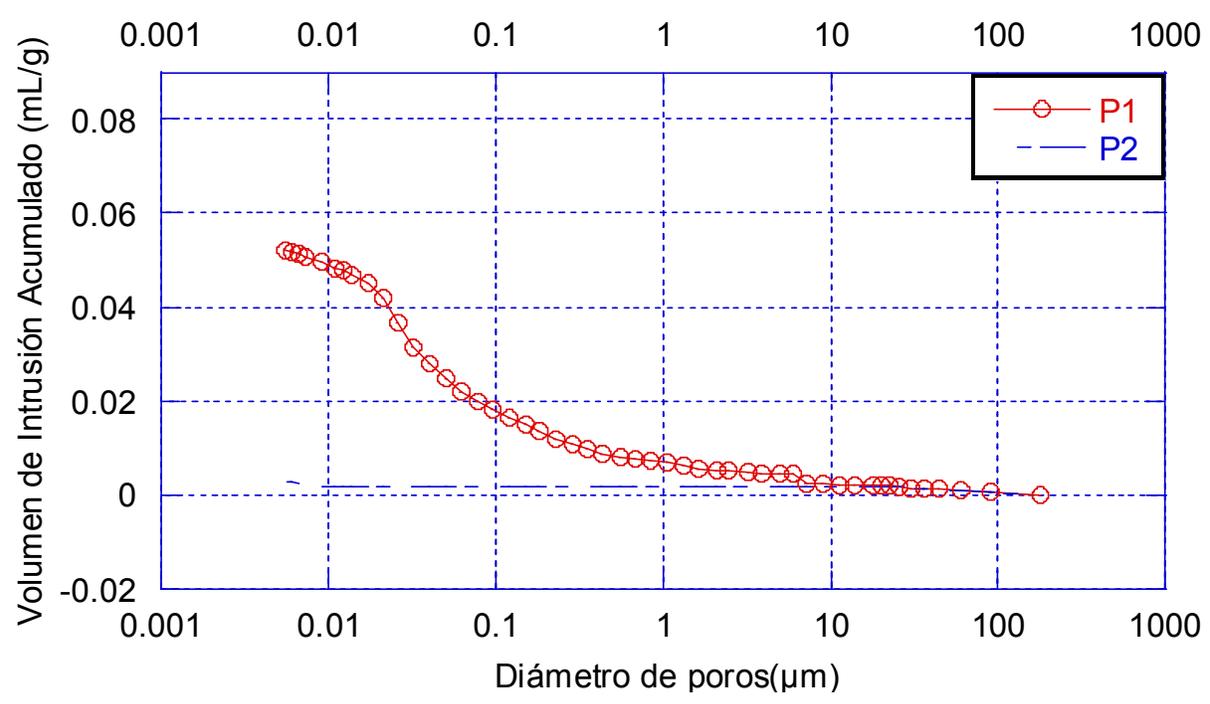


Figura 4.14: Volumen de intrusión acumulado del hormigón PC75-FA12.5-SLAG12.5

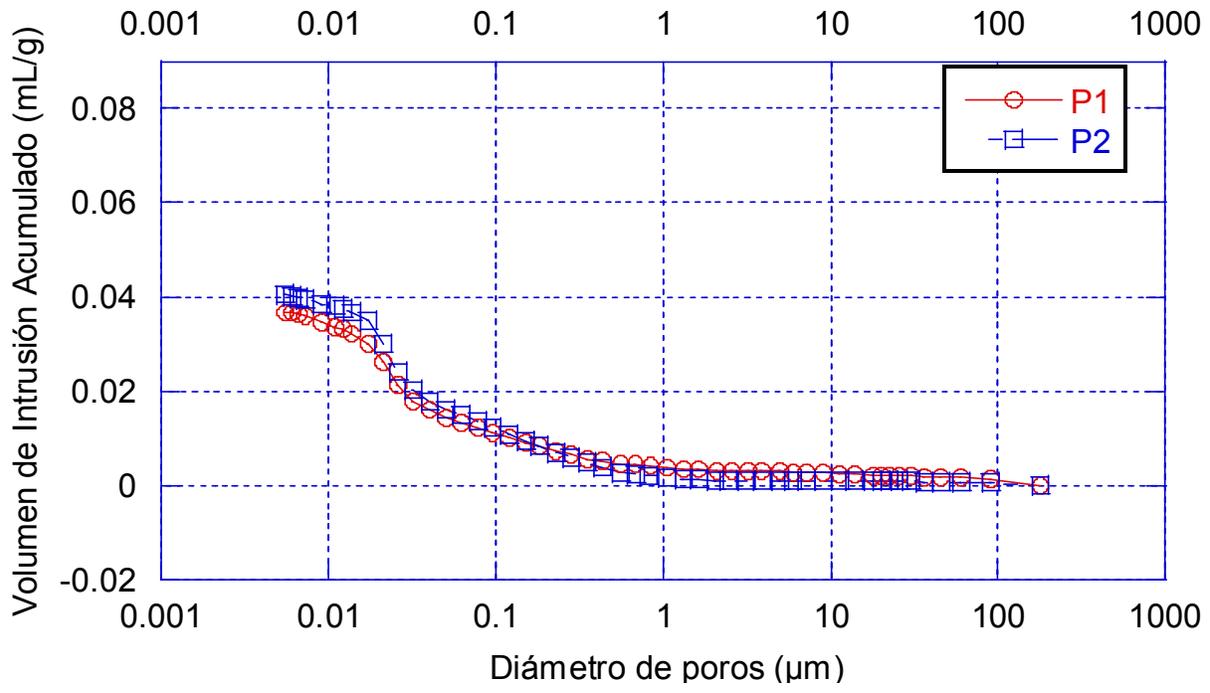


Figura 4.15: Volumen de intrusión acumulado del hormigón PC75-FA12.5-VA12.5

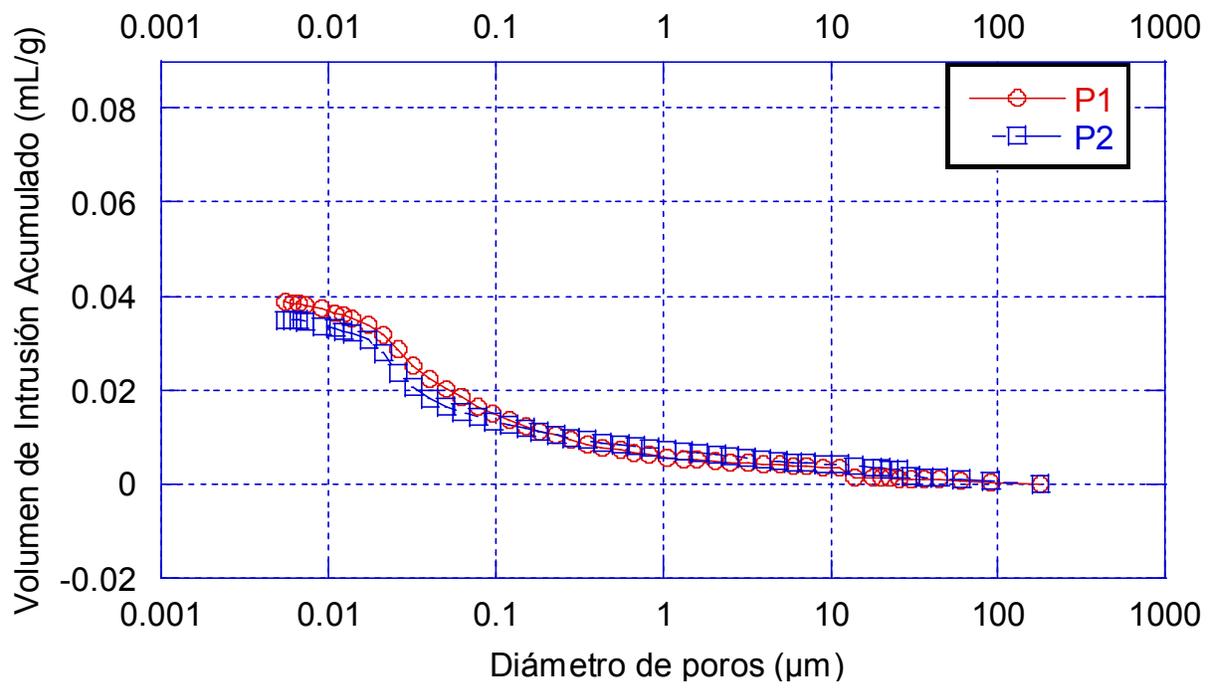


Figura 4.16: Volumen de intrusión acumulado del hormigón denominado PC75-SLAG12.5-VA12.5

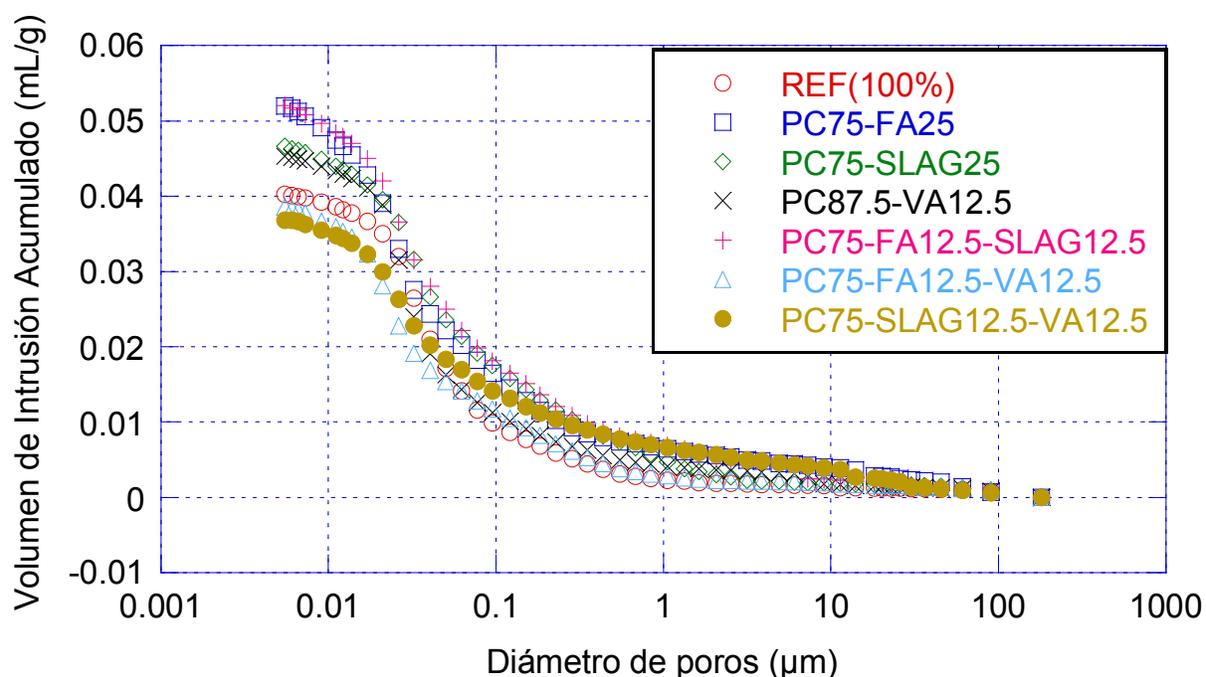


Figura 4.17: Volumen de intrusión acumulado medio de todos los hormigones estudiados

De acuerdo a la Figura 4.17 se puede apreciar que sólo en los hormigones PC75-FA12.5-VA12.5 y PC75-SLAG12.5-VA12.5 el volumen de intrusión acumulado es más bajo que en el hormigón de referencia. De igual manera, según se puede apreciar en la Tabla 4.2, estos dos hormigones son los únicos que presenta una porosidad total menor que el hormigón de referencia. En la Figura 4.17 se puede apreciar que los hormigones con más volumen de intrusión acumulado son PC75-FA25 y PC75-FA12.5-SLAG12.5, de igual forma son los que presentan el mayor porcentaje de porosidad total interconectada.

Tabla 4.2: Porosimetría por intrusión de mercurio: Porcentaje de porosidad total interconectada

Hormigón	Porosidad (%)		
	Prueba 1	Prueba 2	Promedio
REF(100%)	8.85	9.72	9.29
PC75-FA25	12.23	10.83	11.53
PC75-SLAG25	10.74	10.22	10.48
PC87.5-VA12.5	11.59	9.14	10.37
PC75-FA12.5-SLAG12.5	11.55	11.55	11.55
PC75-FA12.5-VA12.5	8.57	9.48	9.03
PC75-SLAG12.5-VA12.5	9.01	8.24	8.63

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.2 muestra el valor obtenido de cada probeta y un valor promedio de todas las probetas estudiadas. Según se aprecia en la Tabla 4.2, el empleo de adiciones minerales no necesariamente produce una reducción en la porosidad total de los hormigones. Las reducciones en la porosidad se aprecian en las combinaciones de cenizas volcánicas con cenizas volantes y en la combinación de cenizas volcánicas con escoria de alto horno.

Las Figuras 4.18 a 4.24 muestran los resultados de los logaritmos de los volúmenes de las intrusiones diferenciales obtenidos en los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio para cada hormigón estudiado, con distinto tipo de adición mineral y dosificación a los 180 días de curado. Los valores presentados corresponden a las intrusiones medias de las probetas ensayadas.

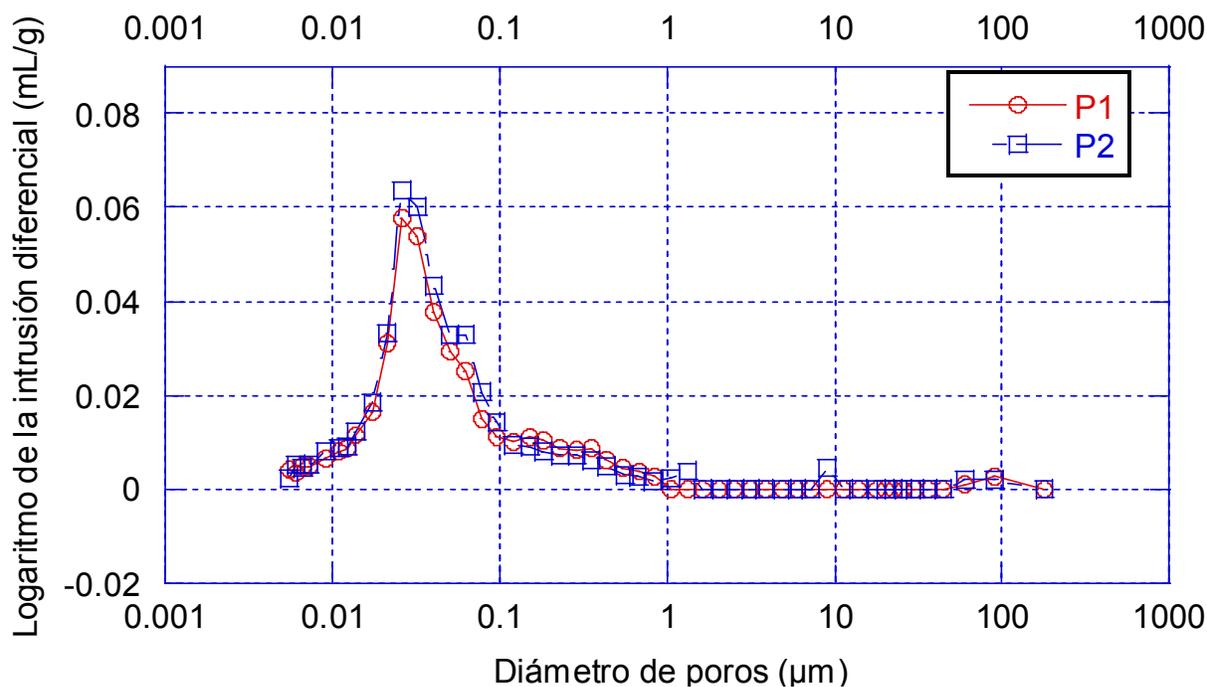


Figura 4.18: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado REF(100%)

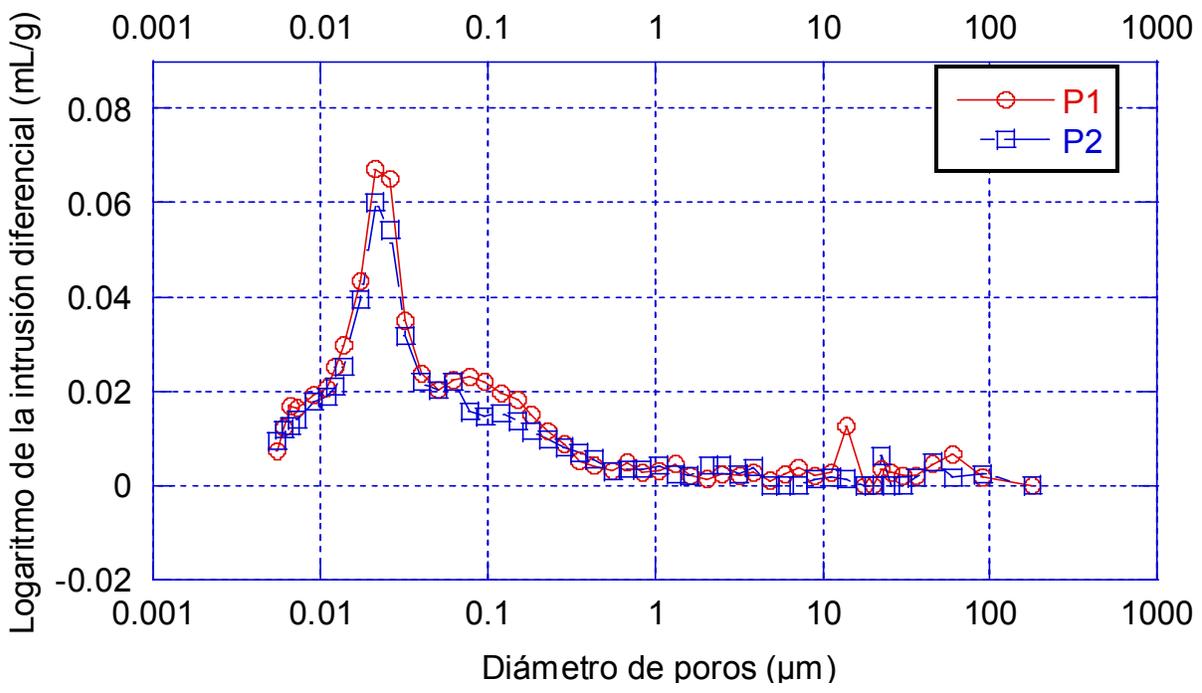


Figura 4.19: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC75-FA25

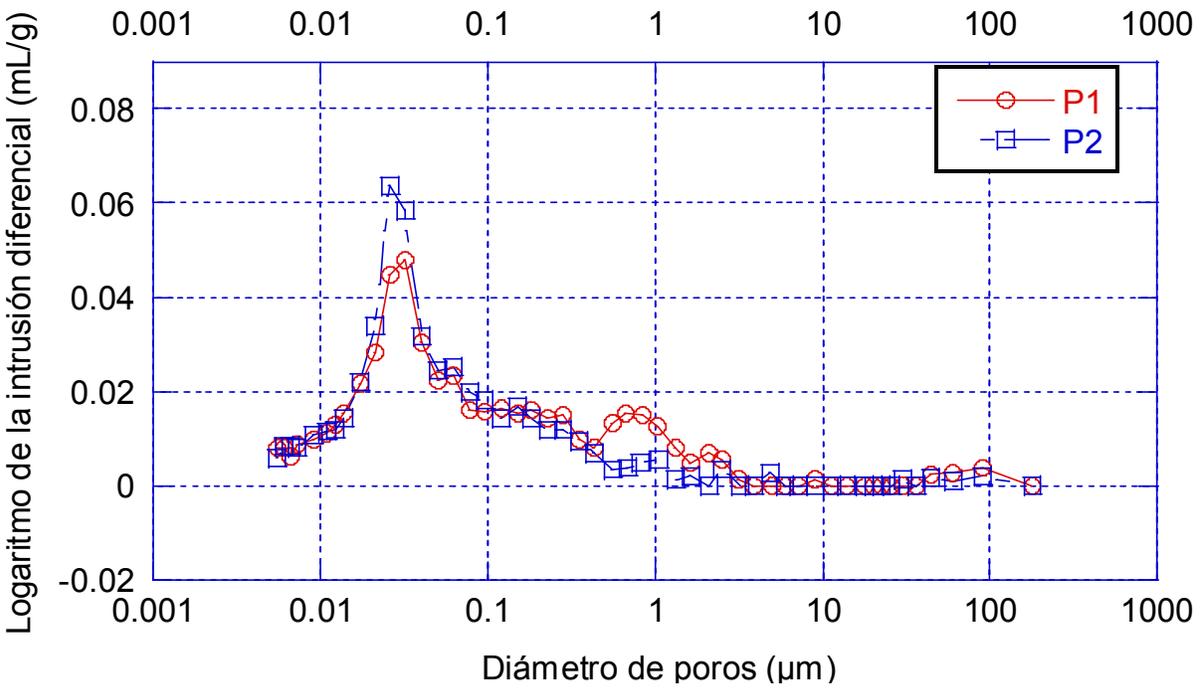


Figura 4.20: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC75-SLAG25

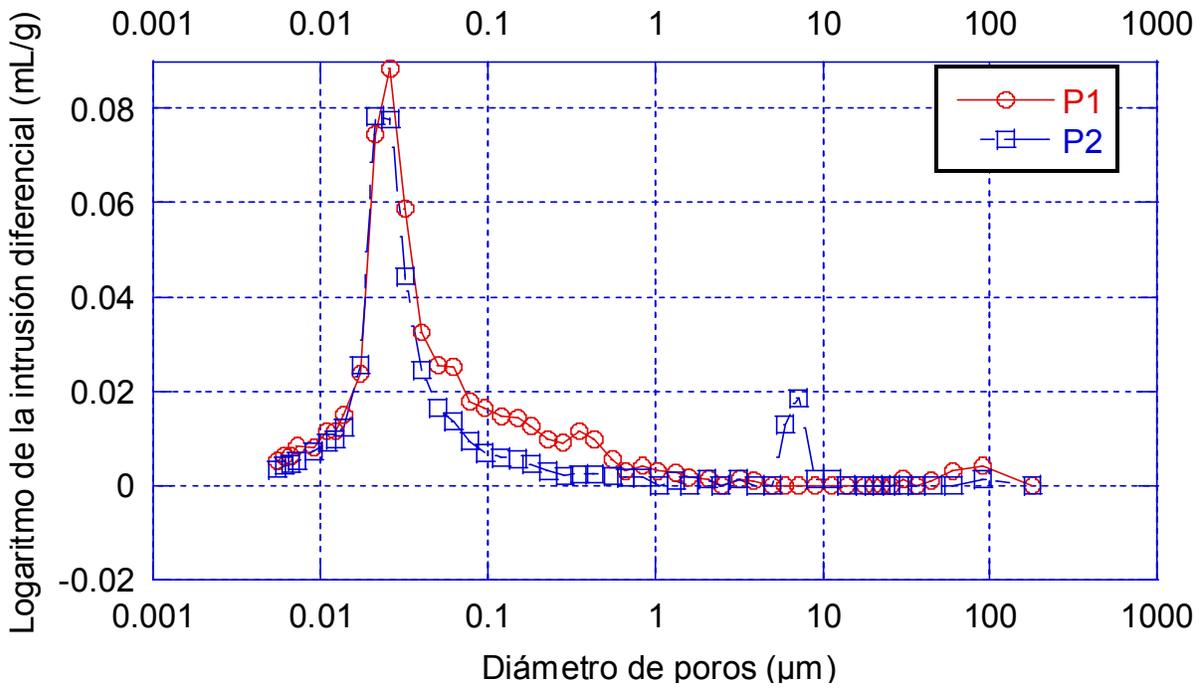


Figura 4.21: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón denominado PC87.5-VA12.5

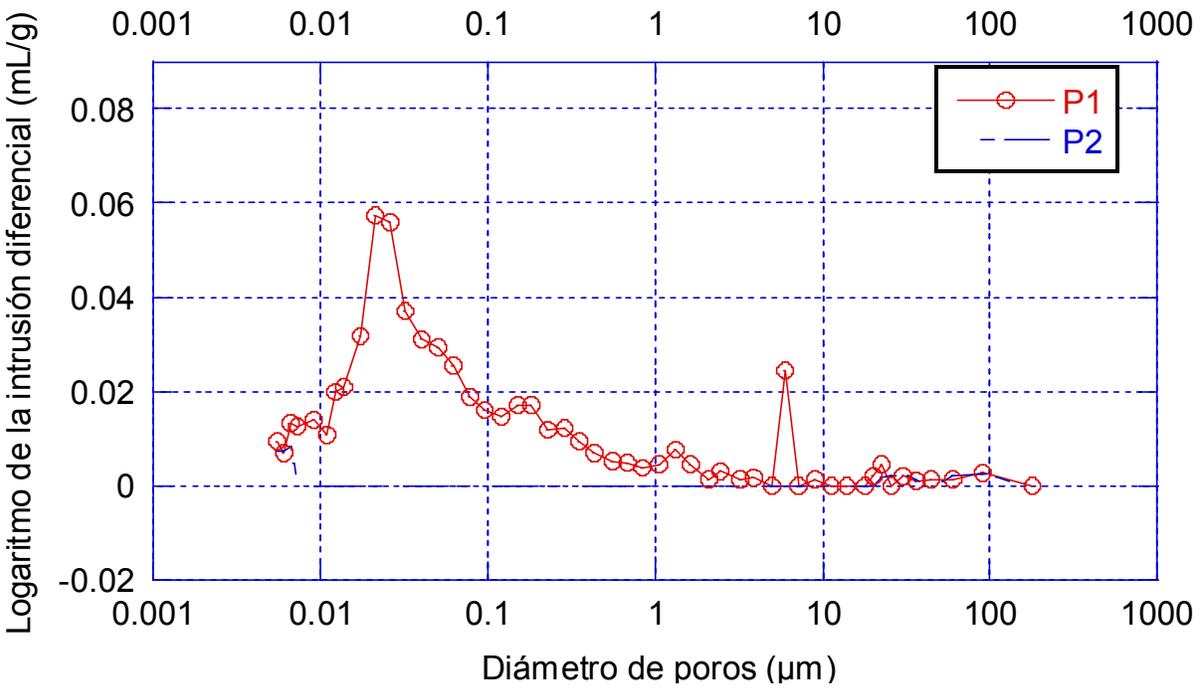


Figura 4.22: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-FA12.5-SLAG12.5

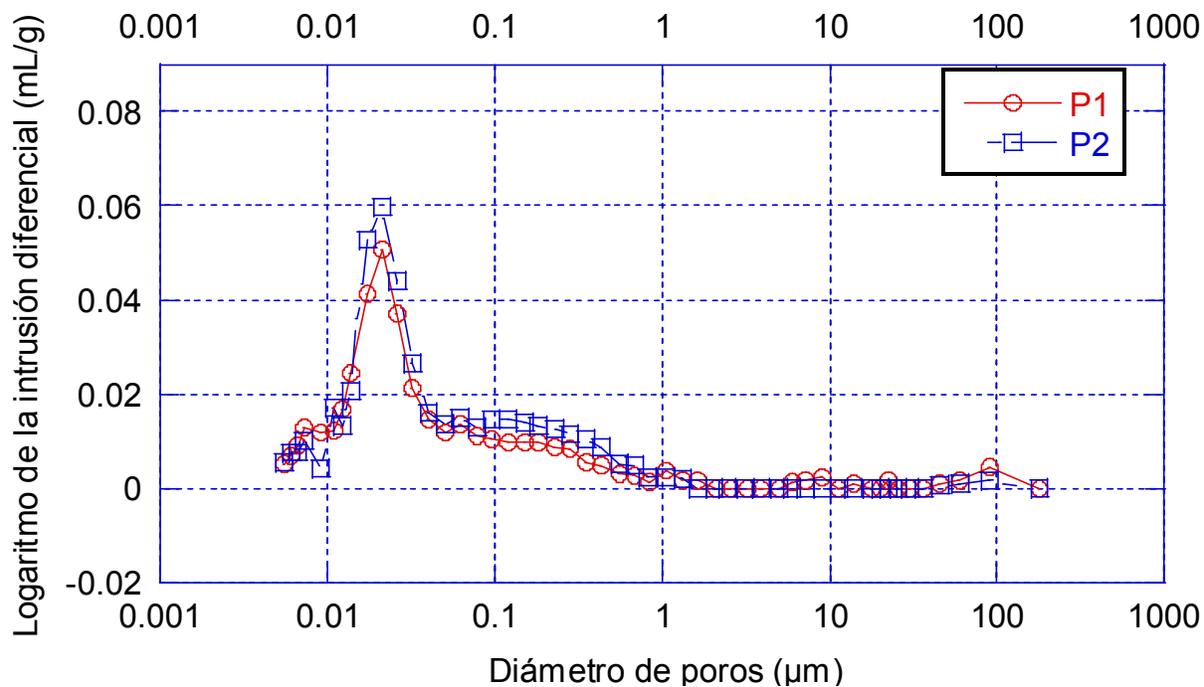


Figura 4.23: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-FA12.5-VA12.5

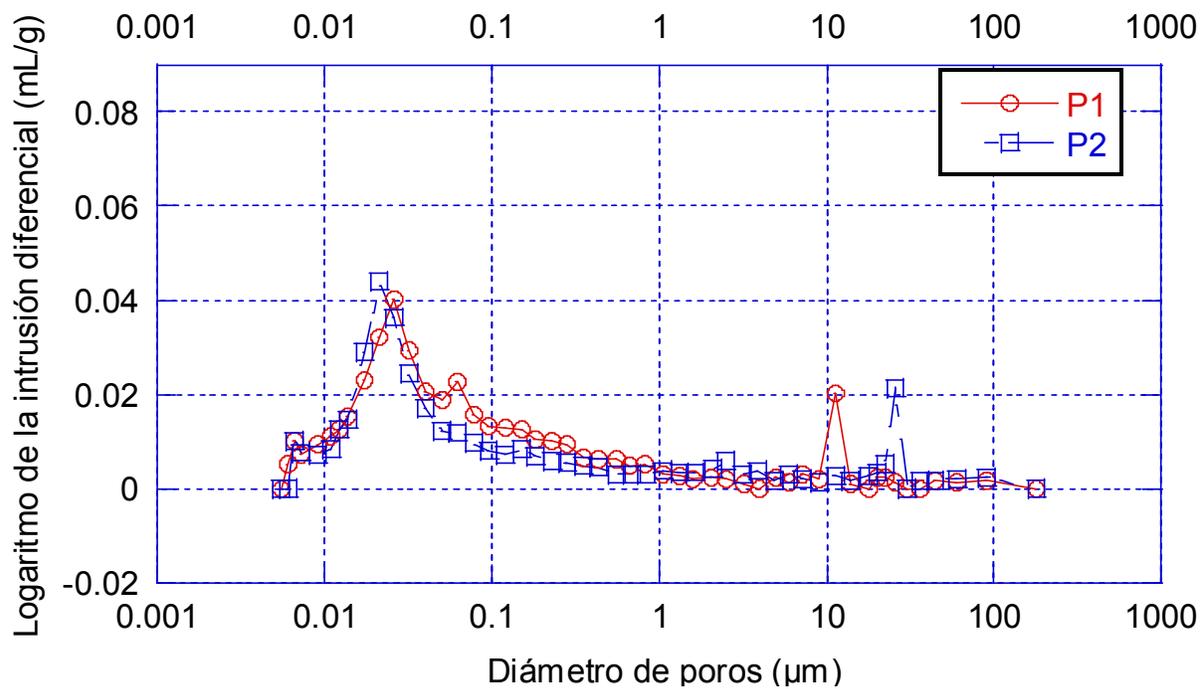


Figura 4.24: Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón PC75-SLAG12.5-VA12.5

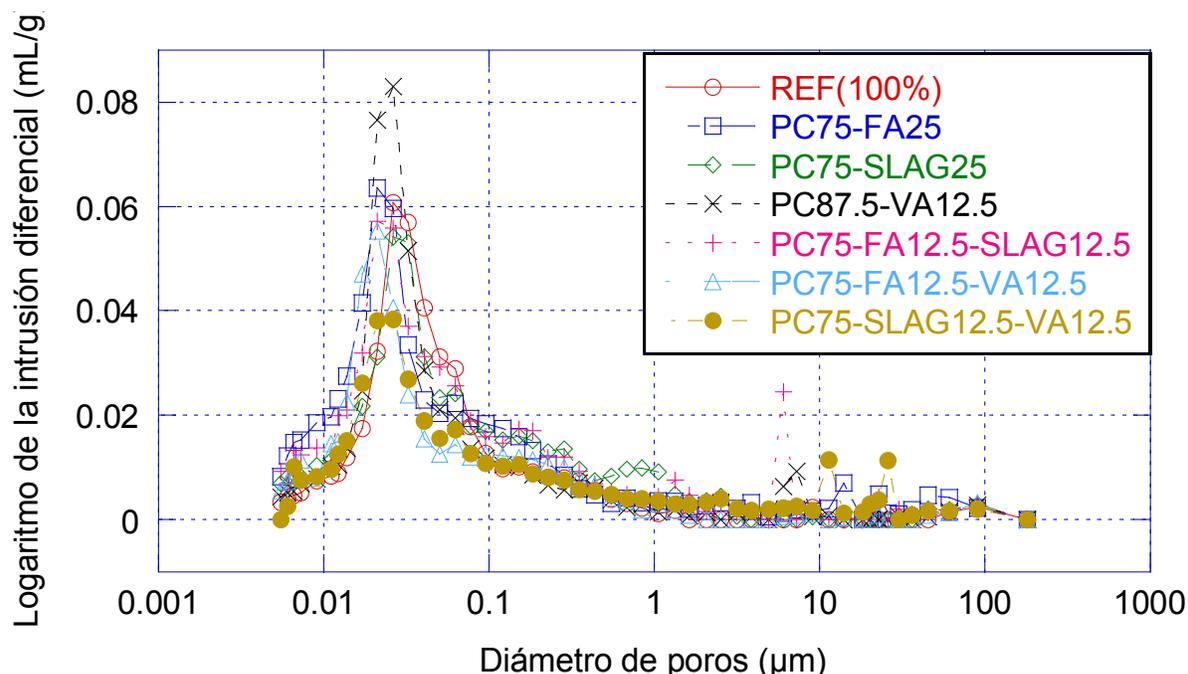


Figura 4.25: Logaritmo de la intrusión diferencial media de todos los hormigones estudiados

De acuerdo a la Figura 4.25 se puede apreciar que el pico del hormigón de referencia está más a la derecha que los demás, excepto ligeramente PC75-SLAG25, lo que indica un mayor tamaño de su diámetro crítico. En los hormigones PC75-FA25 y PC87.5-VA12.5 existe mayor concentración de un determinado diámetro de poros que en el hormigón de referencia. Es de notar en la gráfica 4.25 que la mayor concentración de poros es de entre 20 y 30 nm tanto para los hormigones de referencia como para el resto.

La Figura 4.26 muestra la superposición del promedio de los resultados de los volúmenes de intrusión acumulado y logaritmo de la intrusión diferencial del conjunto de amasados.

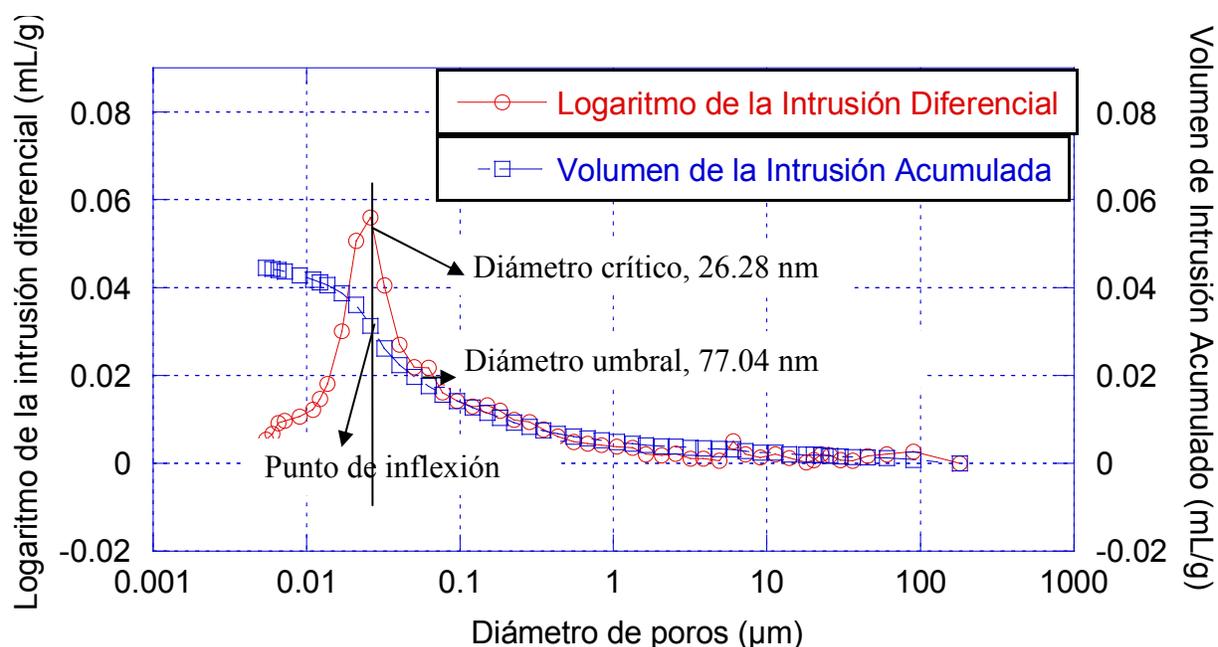


Figura 4.26: Superposición volumen intrusión acumulado vs logaritmo intrusión diferencial del conjunto de amasados.

La Tabla 4.3 presenta los parámetros obtenidos a partir de los resultados de las porosimetrías por intrusión de mercurio. Los valores presentados corresponden a las intrusiones medias de las probetas ensayadas.

Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de la porosimetría por intrusión de mercurio

Amasados	Parámetros			
	Volumen de macroporos (ml/g)	Volumen de mesoporos (ml/g)	Diámetro crítico (nm)	Diámetro umbral (nm)
<b>REF (100%)</b>	0.135926	0.464898	26.281	108.1
<b>PC75-FA25</b>	0.256198	0.560767	21.083	40.3
<b>PC75-SLAG25</b>	0.230559	0.535758	29.329	58.7
<b>PC87.5-VA12.5</b>	0.173755	0.506977	23.680	77.1
<b>PC75-FA12.5-SLAG12.5</b>	0.266131	0.582107	21.085	77.0
<b>PC75-FA12.5-VA12.5</b>	0.156499	0.414678	21.084	40.3
<b>PC75-SLAG12.5-VA12.5</b>	0.238317	0.416467	23.686	40.3

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.27 muestra los resultados obtenidos de los diámetros críticos y umbral para cada hormigón estudiado a partir del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio. Los valores presentados corresponden a las intrusiones medias de las probetas ensayadas.

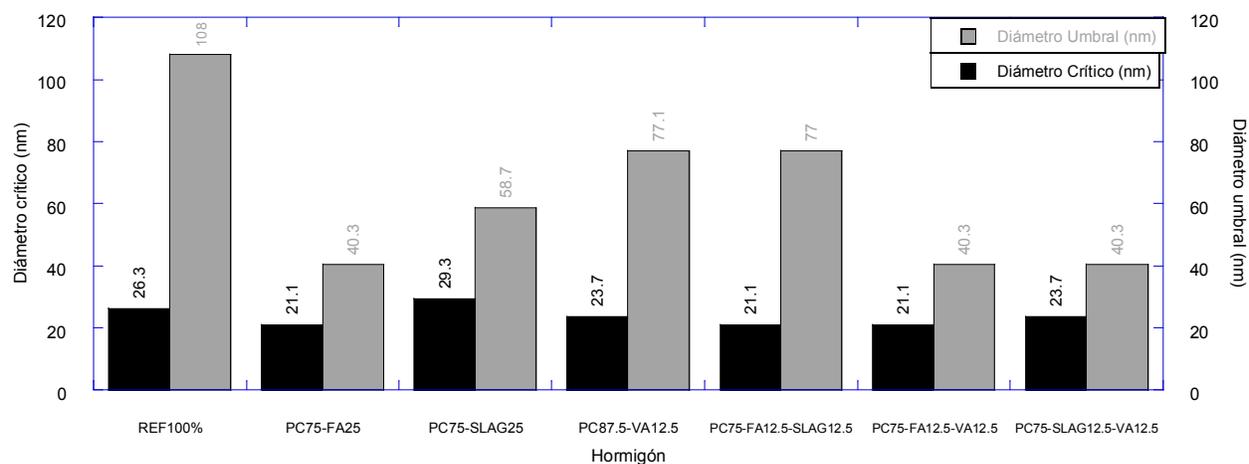


Figura 4.27: Diámetros críticos y umbral por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro umbral, y el menor diámetro crítico. Sin embargo, el hormigón REF 100% muestra el diámetro umbral más alto y el segundo diámetro crítico más alto.

#### 4.6 Diámetro umbral y resistencia a compresión

La Figura 4.28 muestra los resultados obtenidos de diámetro umbral medido por MIP y la prueba de resistencia a compresión para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

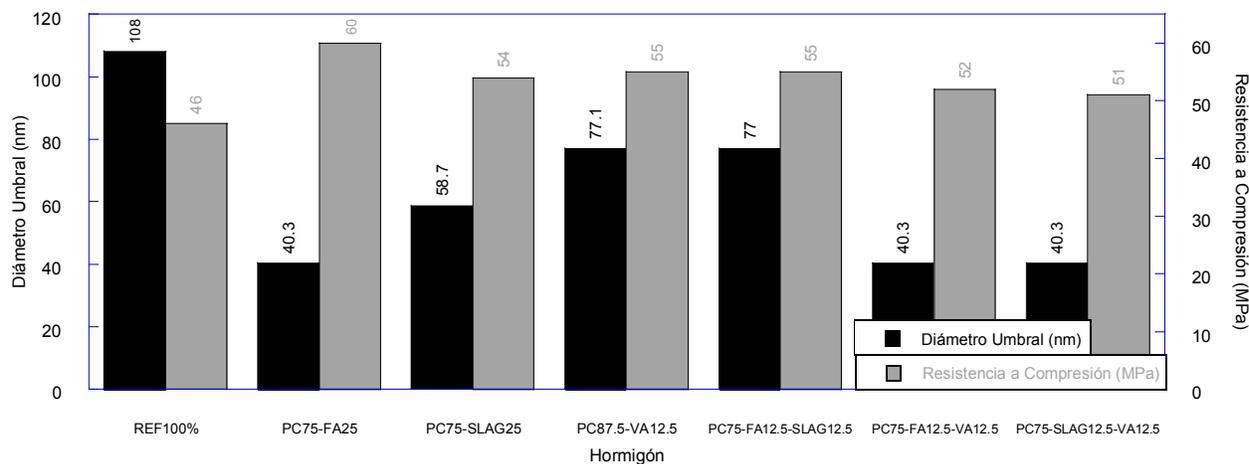


Figura 4.28: Diámetro umbral y resistencia a compresión por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro umbral, y la mayor resistencia a compresión. De igual forma el hormigón REF 100% muestra el diámetro umbral más alto y la menor resistencia a compresión.

#### 4.7 Diámetro umbral y porosidad mediante porosimetría por intrusión de mercurio

La Figura 4.29 muestra los resultados obtenidos de diámetro umbral y porosidad total, ambas medidas por MIP para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

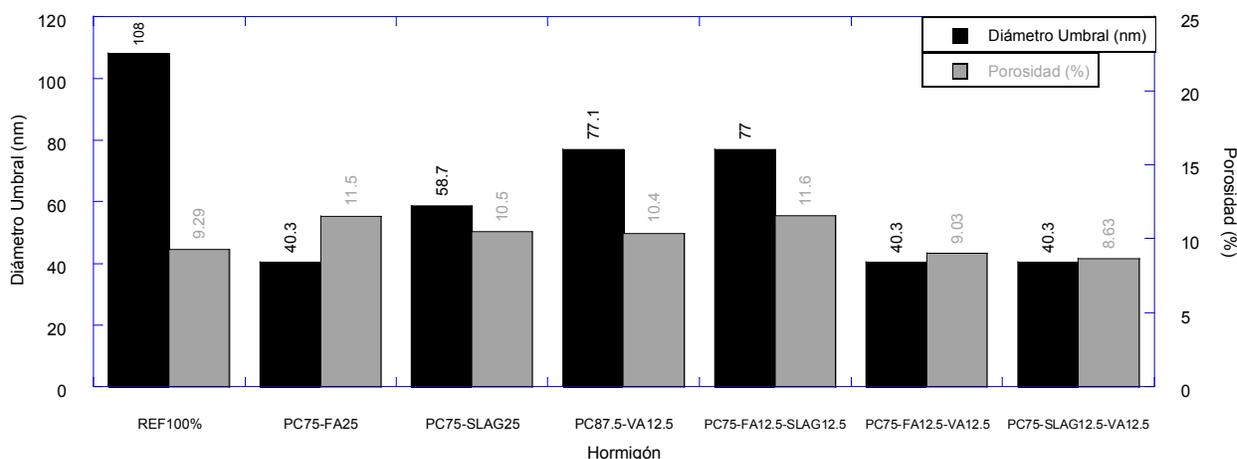


Figura 4.29: Diámetro umbral y volumen de poros conectados por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro umbral, y el mayor volumen de poros conectados. Sin embargo el hormigón REF 100% muestra el diámetro umbral más alto y uno de los más bajos volúmenes de poros conectados.

#### 4.8 Diámetro umbral y resistencia a penetración ión cloruro

La Figura 4.30 muestra los resultados obtenidos de diámetro umbral medido por MIP y la prueba de resistencia a penetración ión cloruro para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

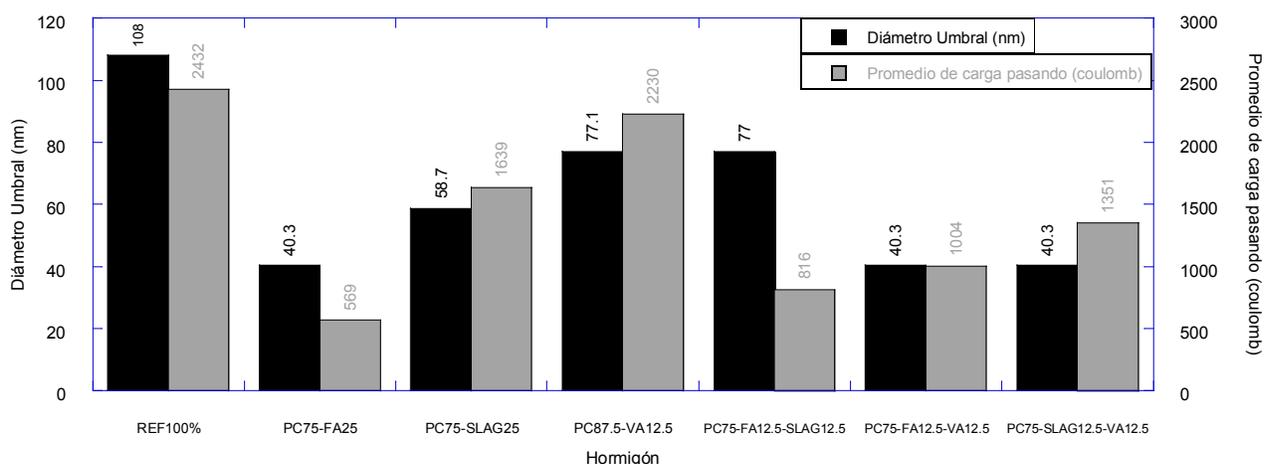


Figura 4.30: Diámetro umbral y resistencia a penetración ión cloruro por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro umbral, y la más baja permeabilidad al ión cloruro. De igual manera manteniendo la relación el hormigón REF 100% muestra el diámetro umbral más alto y la más alta permeabilidad al ión cloruro.

#### 4.9 Diámetro crítico y resistencia a compresión

La Figura 4.31 muestra los resultados obtenidos de diámetro crítico medido por MIP y la prueba de resistencia a compresión para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

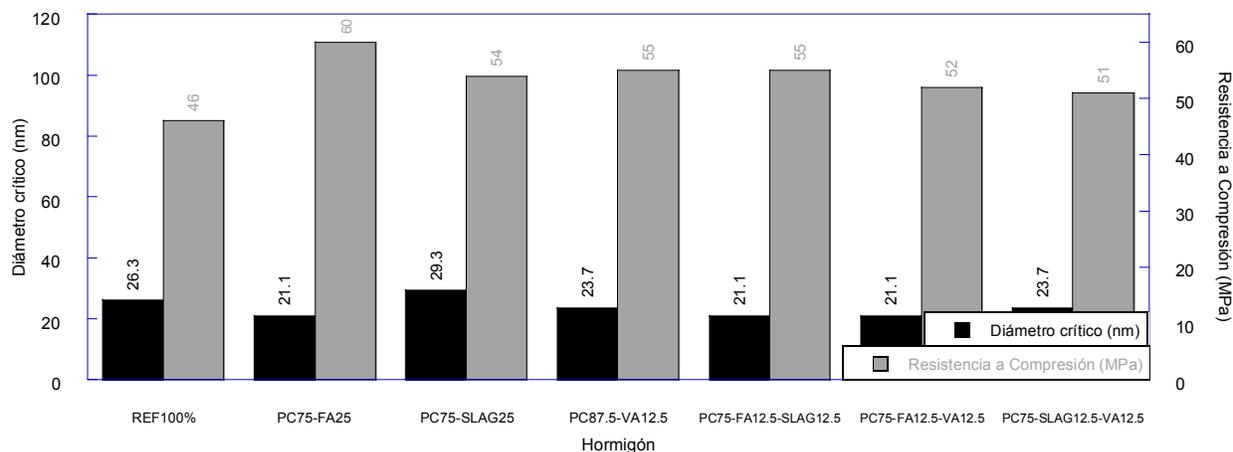


Figura 4.31: Diámetro crítico y resistencia a compresión por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro crítico, y la mayor resistencia a compresión. Sin embargo el hormigón REF 100% muestra el segundo diámetro crítico más alto y la menor resistencia a compresión.

#### 4.10 Diámetro crítico y porosidad mediante porosimetría por intrusión de mercurio

La Figura 4.32 muestra los resultados obtenidos de diámetro crítico y porosidad total, ambas medidas por MIP para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

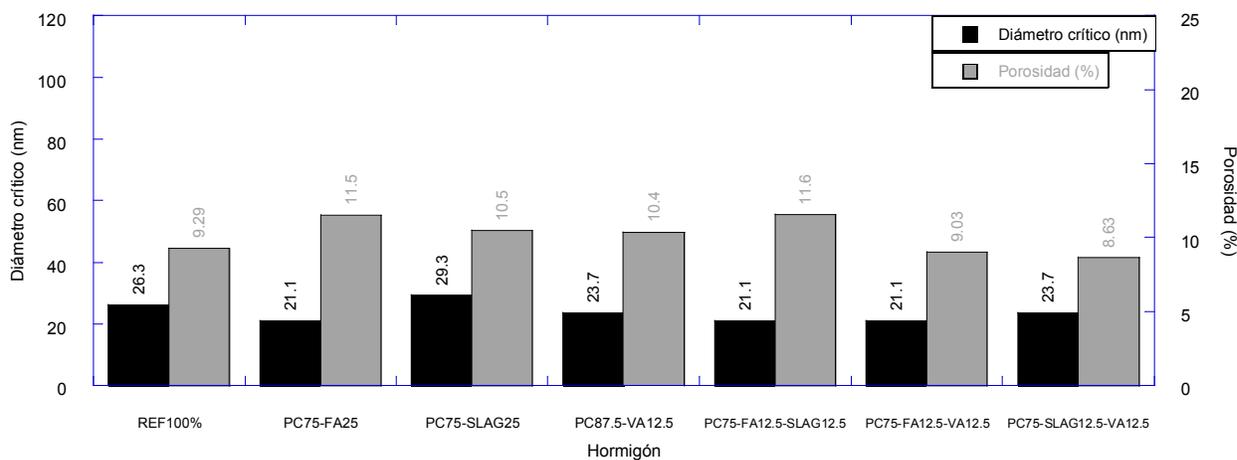


Figura 4.32: Diámetro crítico y volumen de poros conectados por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro crítico, y el mayor volumen de poros conectados. Sin embargo el hormigón REF 100% muestra el segundo diámetro crítico más alto y uno de los más bajos volúmenes de poros conectados.

#### 4.11 Diámetro crítico y resistencia a penetración ión cloruro

La Figura 4.33 muestra los resultados obtenidos de diámetro crítico medido por MIP y la prueba de resistencia a penetración ión cloruro para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

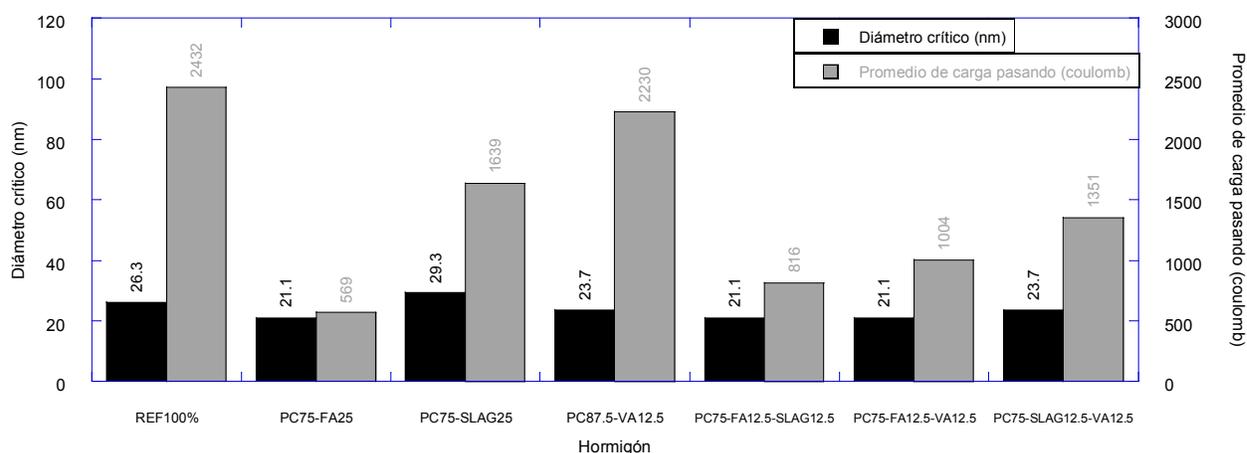


Figura 4.33: Diámetro crítico y resistencia a penetración ión cloruro por cada dosificación

El hormigón PC75-FA25 muestra el menor diámetro crítico, y la más baja permeabilidad al ión cloruro. De igual manera manteniendo la relación el hormigón REF 100% muestra el segundo diámetro crítico más alto y la más alta permeabilidad al ión cloruro.

#### 4.12 Resistencia a compresión y porosimetría por intrusión de mercurio

La Figura 4.34 muestra los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a compresión y porosidad total medida por MIP para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de

combinaciones de las adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al resultado promedio de al menos dos muestras de concreto. La prueba se realizó a los 180 días de curado.

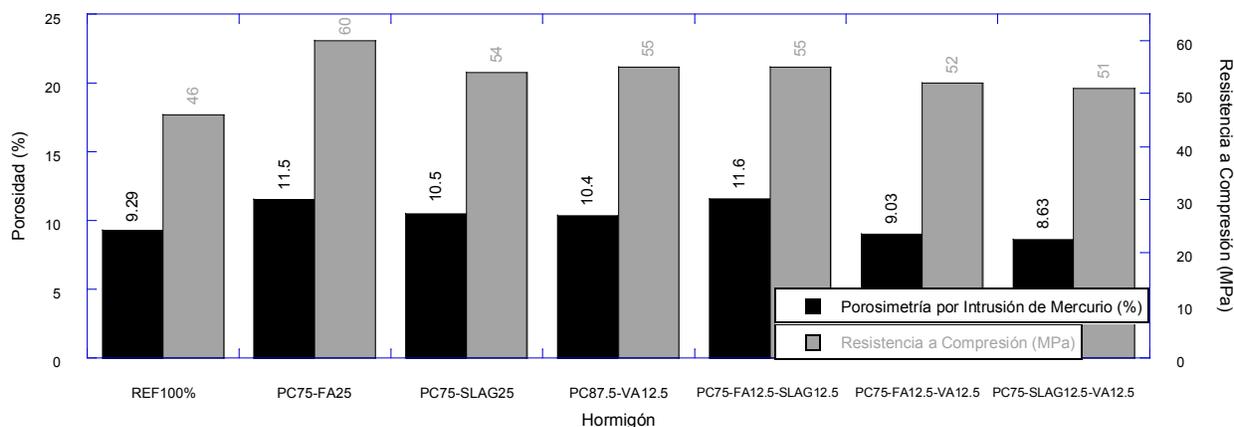


Figura 4.34: Volumen de poros conectados y resistencia a la compresión

El hormigón PC75-FA25 muestra el mayor volumen de poros conectados, y presenta el valor más alto de resistencia a la compresión. Sin embargo, el hormigón REF 100% muestra uno de los más bajos volúmenes de poros conectados, y presenta el más bajo valor a compresión.

#### 4.13 Porosimetría por intrusión de mercurio y resistencia a penetración ión cloruro

La Figura 4.35 muestra los resultados obtenidos en el análisis de conectividad porosa total medida por el MIP y la penetración de iones cloruro para cada mezcla, de acuerdo con los diferentes tipos de combinaciones de adiciones minerales. Los valores mostrados corresponden al promedio de dos especímenes. Las pruebas se realizaron a los 180 días de curado.

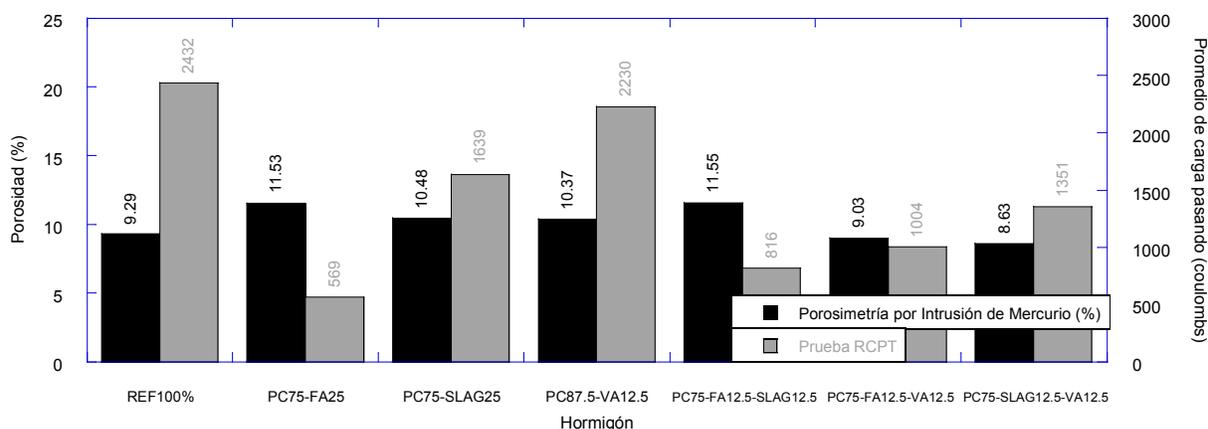


Figura 4.35: Volumen de poros conectados y penetración del ión cloruro basado en la carga pasando

El hormigón P75-FA25 muestra la penetración de ión cloruro más bajo en el RCPT, y presenta el valor más alto para el volumen de poros conectados. Sin embargo, el hormigón REF100% muestra uno de los valores más bajo para el volumen de poros conectados, y presenta el valor más altos de penetración de iones de cloruro en el RCPT.

#### **4.14 Valoración estadística**

Los métodos estadísticos se pueden utilizar como una herramienta de apoyo para describir la variabilidad de una población o muestra. Además, proporcionan instrumentos para detallar las fuentes de la variabilidad y el impacto de éstas sobre el objeto de estudio. Este apartado presenta la técnica de estadística Análisis de la Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) para estudiar los resultados obtenidos a distintas edades de curado para diferentes ensayos.

##### **4.14.1 Valoración estadística: análisis de varianza**

El análisis de la varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) es una técnica estadística de contraste de hipótesis. La hipótesis nula a contrastar es que se consideran iguales las medidas en todos los grupos o que no existen diferencias significativas entre las medidas obtenidas por cada uno de los grupos formados por las variables independientes. Esta técnica analiza globalmente la influencia de cada variable independiente, generándose un único nivel de significación.

En el análisis de la varianza se puede analizar simultáneamente la influencia de dos o más factores de clasificación (variables independientes) sobre una variable de respuesta continua (variable dependiente). Esto se conoce como análisis factorial de la varianza. Además, el efecto de un factor puede añadirse al de otro factor (modelo aditivo) o bien puede potenciarse (modelo multiplicativo). En este último caso, aparece y se analiza un nuevo factor de interacción sobre la variable respuesta, como resultado de la acción conjunta de dos o más factores. Este posible

efecto es detectado en el análisis de la varianza por la significación de su estadístico de contraste correspondiente (Conceptos Básicos en Estadística 2008). En la Tabla 4.4 se presenta una tabla con el modelo estadístico (ANOVA).

Tabla 4.4: Modelo ANOVA para un modelo factorial de dos factores con efectos fijos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coficiente F (Fisher)
Tratamiento A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamiento B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Residuos	$SS_E$	$ab(n - 1)$		
Total	$SS_T$	$abn - 1$	$MS_{AB} = \frac{SS_E}{(ab)(n - 1)}$	

Fuente: (Montgomery and Runger 2002)

Donde las ecuaciones para calcular las sumas de los cuadrados para dos variables independientes son:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2 \dots}{bn} - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad 4.1$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_j^2 \dots}{an} - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad 4.2$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij}^2}{n} - \frac{y^2 \dots}{abn} - SS_A - SS_B \quad 4.3$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad 4.4$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad 4.5$$

Además para facilitar la interpretación de los resultados, a la hora de realizar inferencias, se puede presentar el nivel de significación empírico del contraste (valor  $p$ ). El valor  $p$  asociado a un resultado observado es la probabilidad de obtener un valor como el observado o más extremo si la hipótesis nula es cierta. Es posible rechazar la hipótesis nula si el valor  $p$  asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significación establecido.

El valor  $p$  obtenido del análisis indica si la variable independiente tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable dependiente. En las tablas a presentar en lo adelante un valor de  $p$  inferior a 0.05 indica una contribución significativa de la variable independiente en cuestión. Dado que el análisis elimina los efectos de las otras variables, un valor superior a 0.05 indica que el efecto de la variable independiente no es significativo.

#### 4.14.1.1 Análisis de la varianza: propiedades mecánicas

La Tabla 4.5 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes cantidad de muestras por ensayo, días de curado y dosificación de amasados, para la variable dependiente resistencia a compresión a todas las edades de curados. El valor  $p = 0.000$  y el valor  $p = 0.015$  indica que la cantidad de días de curado y el tipo de dosificación de amasado tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión respectivamente para un 95% de probabilidad.

Tabla 4.5: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a todas las edades de curados

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Coefficiente F</b>	<b>Coefficiente P</b>
<i>Variables independientes</i>					
Cantidad de muestras por ensayo	28600	1	28600	0.12	0.734
Días de curado	58147269	3	19382423	79.35	0.000
Dosificación de amasados	4475555	6	745926	3.05	0.015
<i>Otros</i>					
Residuos	9282561	38	244278		
Total	71933985	48			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.6 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de cenizas volcánicas, dosis de cenizas volantes y dosis de escoria de alto horno, para la variable dependiente resistencia a compresión a los 7 días de curado. Los valores p indican que las dosis de cenizas volcánicas, volantes y escoria de alto horno no tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 7 días de curado para un 95% de probabilidad.

Tabla 4.6: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 7 días de curado

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Coefficiente F</b>	<b>Coefficiente P</b>
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de cenizas volcánicas	192114	1	192114	2.66	0.350
Dosis de cenizas volantes	2275365	2	1137683	15.76	0.175
Dosis de escoria de alto horno	162658	2	81329	1.13	0.554
<i>Otros</i>					
Residuos	72200	1	72200		
Total	2702337	6			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.7 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de cenizas volcánicas, dosis de cenizas volantes y dosis de escoria de alto horno, para la variable dependiente resistencia a compresión a los 28 días de curado. Los valores p indican que las dosis de cenizas volcánicas, volantes y escoria de alto horno no tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 28 días de curado para un 95% de probabilidad.

Tabla 4.7: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 28 días de curado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de cenizas volcánicas	145008	1	145008	1.27	0.293
Dosis de cenizas volantes	888026	2	444013	3.88	0.066
Dosis de escoria de alto horno	210926	2	105463	0.92	0.436
<i>Otros</i>					
Residuos	914344	8	114293		
Total	2158304	13			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.8 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de cenizas volcánicas, dosis de cenizas volantes y dosis de escoria de alto horno, para la variable dependiente resistencia a compresión a los 91 días de curado. Los valores  $p = 0.013$  y  $p = 0.022$  indican que las dosis de cenizas volantes y escoria de alto horno tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 91 días de curado para un 95% de probabilidad. Mientras que la variable dosis de cenizas volcánicas no es que no sea significativa, sino, que no es tanto comparados con las más altas resistencias, PC75-25FA (donde es un 93% de la resistencia) y PC75-25SLAG (donde es un 95% de la resistencia) según los parámetros que hemos establecido.

Tabla 4.8: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 91 días de curado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de cenizas volcánicas	232505	1	232505	3.47	0.099
Dosis de cenizas volantes	1040793	2	520397	7.77	0.013
Dosis de escoria de alto horno	858720	2	429360	6.41	0.022
<i>Otros</i>					
Residuos	535704	8	66963		
Total	2667722	13			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.9 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de cenizas volcánicas, dosis de cenizas volantes y dosis de escoria de alto horno, para la variable dependiente resistencia a compresión a los 180 días de curado. El valor  $p = 0.012$  indica que la dosis de cenizas volantes tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 180 días de curado para un 95% de probabilidad. Mientras que las variables dosis de cenizas volcánicas y escoria de alto horno no son comparativamente significativas.

Tabla 4.9: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión a los 180 días de curado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de cenizas volcánicas	392472	1	392472	2.03	0.192
Dosis de cenizas volantes	3153806	2	1576903	8.16	0.012
Dosis de escoria de alto horno	941076	2	470538	2.44	0.149
<i>Otros</i>					
Residuos	1545119	8	193140		
Total	6032473	13			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.10 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes días de curado, dosis de cenizas volcánicas, dosis de cenizas volantes y dosis de escoria de alto horno para la variable dependiente resistencia a compresión. El valor  $p = 0.000$  y  $p = 0.05$  indica que la cantidad de días de curado y la dosis de escoria de alto horno tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión respectivamente para un 95% de probabilidad.

Tabla 4.10: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Días de curado	63761705	3	21253902	80.96	0.000
Dosis de cenizas volcánicas	49905	1	49905	0.19	0.665
Dosis de cenizas volantes	1153737	2	576869	2.20	0.124
Dosis de escoria de alto horno	1694647	2	847324	3.23	0.050
<i>Otros</i>					
Residuos	10501065	40	262527		
Total	77161059	48			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.11 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes, considerando interacciones de la variable días de curado con dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes y dosis de cenizas volcánicas para la variable dependiente resistencia a compresión. Los valores  $p = 0.001$ ,  $p = 0.000$  y  $p = 0.000$  indican que las interacciones de los días de curado con la dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes y volcánicas tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión respectivamente para un 95% de probabilidad.

Tabla 4.11: Modelo ANOVA para la variable dependiente: resistencia a compresión

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Interacciones</i>					
Días de curado - Dosis de escoria de alto horno	7924297	8	990537	4.50	0.001
Días de curado - Dosis de cenizas volantes	30285861	8	3785733	17.18	0.000
Días de curado - Dosis de cenizas volcánicas	9676235	4	2419059	10.98	0.000
Residuos	6168347	28	220298		
Total	54054740	48			

Fuente: Elaboración propia

#### 4.14.1.2 Análisis de la varianza: durabilidad en términos de la resistencia a la penetración del ión cloruro.

La Tabla 4.12 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes, dosis de cenizas volcánicas, cantidad de muestras del ensayo y lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra, para la variable dependiente penetración ión cloruro a los 180 días de curado. Los valores  $p = 0.001$ ,  $p = 0.000$  y  $p = 0.016$  indica que la dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes y tomar la lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la penetración ión cloruro a los 180 días de curado respectivamente para un 95% de probabilidad. Mientras que la variable dosis de cenizas volcánicas no tiene este efecto.

Tabla 4.12: Modelo ANOVA para la variable dependiente: penetración ión cloruro a los 180 días de curado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de escoria de alto horno	1672069	2	836035	10.14	0.001
Dosis de cenizas volantes	7386113	2	3693057	44.80	0.000
Dosis de cenizas volcánicas	241500	1	241500	2.93	0.102
Cantidad de muestras del ensayo	55893	1	55893	0.68	0.420
Lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra	573430	1	573430	6.96	0.016
<i>Otros</i>					
Residuos	1648569	20	82428		
Total	11577574	27			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.13 presenta el análisis de la varianza para las variables independientes dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes, dosis de cenizas volcánicas y lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra, para la variable dependiente penetración ión cloruro a los 180 días de curado. Los valores  $p = 0.001$ ,  $p = 0.000$  y  $p = 0.015$  indica que la dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes y tomar la lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la penetración ión cloruro a los 180 días de curado respectivamente para un 95% de probabilidad. Mientras que la variable dosis de cenizas volcánicas no demuestra ese efecto en estos resultados.

Tabla 4.13: Modelo ANOVA para la variable dependiente: penetración ión cloruro a los 180 días de curado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coefficiente F	Coefficiente P
<i>Variables independientes</i>					
Dosis de escoria de alto horno	1672069	2	836035	10.30	0.001
Dosis de cenizas volantes	7386113	2	3693057	45.50	0.000
Dosis de cenizas volcánicas	241500	1	241500	2.98	0.099
Lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra	573430	1	573430	7.07	0.015
<i>Otros</i>					
Residuos	1704461	21	81165		
Total	11577573	27			

Fuente: Elaboración propia

#### 4.14.1.3 Conclusiones parciales del análisis de la varianza sobre la influencia de las variables independientes en las propiedades mecánicas

El análisis de varianza examina la influencia de la cantidad de muestras por ensayo, días de curado y dosificación de amasados (variables independientes) sobre la resistencia a compresión en general y por días de curado. El análisis permite concluir que la cantidad de días de curado y el tipo de dosificación de amasado tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión. Se concluye de igual modo que las dosis de cenizas volcánicas, volantes y escoria de al horno no tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de curado. Las dosificaciones que empiezan a ser significativas son las dosis de cenizas volantes y escoria de alto horno a los 91 días de curado. Mientras que la variable dosis de cenizas volcánicas no es que no sea significativa, sino, que no es tanto comparados con las más altas resistencias, PC75-25FA (cenizas volcánicas es un 93% de esta resistencia) y PC75-25SLAG (cenizas volcánicas es un 95% de esta resistencia) según los parámetros que hemos establecidos. Finalmente la dosis de cenizas volantes es la única que tiene

un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 180 días de curado.

#### **4.14.1.4 Conclusiones parciales del análisis de la varianza sobre la influencia de las variables independientes en la durabilidad en términos de la resistencia a la penetración del ión cloruro.**

El análisis de varianza examina la influencia de la dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes, dosis de cenizas volcánicas, cantidad de muestras del ensayo y lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra (variables independientes) sobre la penetración del ión cloruro a los 180 días de curado. El análisis permite concluir que la dosis de escoria de alto horno, dosis de cenizas volantes y tomar la lectura en la rodaja superior del espécimen de muestra tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la penetración ión cloruro a los 180 días de curado. Mientras que la variable dosis de cenizas volcánicas no presenta este efecto.

#### **4.14.2 Valoración estadística: regresión polinomial de la muestra**

Este apartado analiza las relaciones no lineales (polinomios) que se establecieron entre variables aleatorias a partir de los valores de las muestras. En el caso de la regresión lineal simple se considera una sola variable independiente ( $x$ ) y una variable dependiente ( $y$ ). Al suponer que la relación entre  $y$  y  $x$  es una recta, la relación se puede describir por el modelo expresado en la ecuación 4.6, donde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  son coeficientes y  $\varepsilon$  es un error aleatorio.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad 4.6$$

$$y = \beta x + \varepsilon \quad 4.7$$

La ecuación 4.7 es un modelo general que se puede utilizar para cualquier relación que sea lineal con parámetros desconocidos  $\beta$ . Esto incluye la importante clasificación de modelos de

regresión de polinomios. Por ejemplo el polinomio de segundo orden (modelo cuadrático) de una variable (ecuación 4.7) y el de dos variables (ecuación 4.8) son modelos de regresión lineal (Montgomery, Peck and Vining 2001).

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \varepsilon \quad 4.8$$

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad 4.9$$

La regresión de polinomios se utiliza ampliamente en situaciones donde la respuesta es curvilínea, ya que incluso complejas relaciones no lineales pueden ser adecuadamente modeladas por polinomios en intervalos razonablemente pequeños de las equis.

En general la ecuación para n grado del modelo de polinomios de una variable viene dada por:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \dots + \beta_nx^n + \varepsilon \quad 4.10$$

Donde:

$\beta_0$ : Ordenada en y cuando  $x=0$

$\beta_1$ : Parámetro de efecto linear

$\beta_2$ : Parámetro de efecto cuadrático (pendiente)

$\beta_n$ : Parámetro de efecto cúbico o grado superior

El método de los mínimos cuadrados de Karl Gauss estima los coeficientes  $\beta_0$  (ordenada al origen) y  $\beta_1$  (pendiente) con el fin de minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones

verticales. En la ecuación de una recta (4.11)  $a$  y  $b$  son los estimadores de los coeficientes  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . A partir de una muestra se pueden obtener los estimadores  $a$  y  $b$ , ecuaciones 4.12 y 4.13.

$$y = a + bx \quad 4.11$$

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad 4.12$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad 4.13$$

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se utiliza para juzgar la adecuación del modelo de regresión. El  $R^2$  puede explicarse como la medida de la variabilidad de los datos que están considerados por el modelo de regresión, ecuación 4.14. Donde SSE se define como la suma de los cuadrados de los errores y SST es la suma total corregida de los cuadrados, ecuaciones 4.17 y 4.16.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad 4.14$$

El estadístico  $R^2$  incorpora el error estándar de la estimación ( $S_{xy}$ ). El  $S_{xy}$  mide la dispersión de los valores respecto a la recta de regresión, ecuación 4.15.

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i(x_i - \bar{x})^2 \quad 4.15$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad 4.16$$

$$SS_E = SS_T + bS_{xy} \quad 4.17$$

En situaciones en que la variable  $y$  depende de dos o más variables independientes, se utilizan modelos de regresión múltiple. Este modelo se puede describir mediante la ecuación 4.18.

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2z + \varepsilon \quad 4.18$$

La descripción teórica de la regresión lineal simple se generaliza para el caso de la regresión lineal múltiple. Se aumenta la dificultad operativa debido al cálculo matricial que se deriva del proceso.

A continuación se muestra las tablas con los resultados del ajuste de un modelo de regresión de polinomios para describir la relación entre una variable dependiente y dos variables independientes. Las variables independientes se obtuvieron de los ensayos de la porosimetría por intrusión de mercurio donde se obtuvo el volumen de mercurio en mesoporos y el diámetro crítico de poros.

En estas tablas el estadístico  $R$  cuadrado ( $R^2$ ) indica que el modelo explica un porcentaje de la variabilidad del factor independiente. Dado que el análisis no toma en consideración los efectos de las otras variables. Un  $R^2$  cercano a 100% indica una contribución significativa de las variables independientes en cuestión. Mientras que un  $R^2$  inferior a 80% indica una alta variabilidad del modelo.

#### 4.14.2.1 Regresión polinomial: resistencia a la penetración del ión cloruro

A continuación se muestran las Figuras y Tablas con los resultados del estadístico  $R^2$  de las variables obtenidas en el ensayo de resistencia a la penetración del ion cloruro.

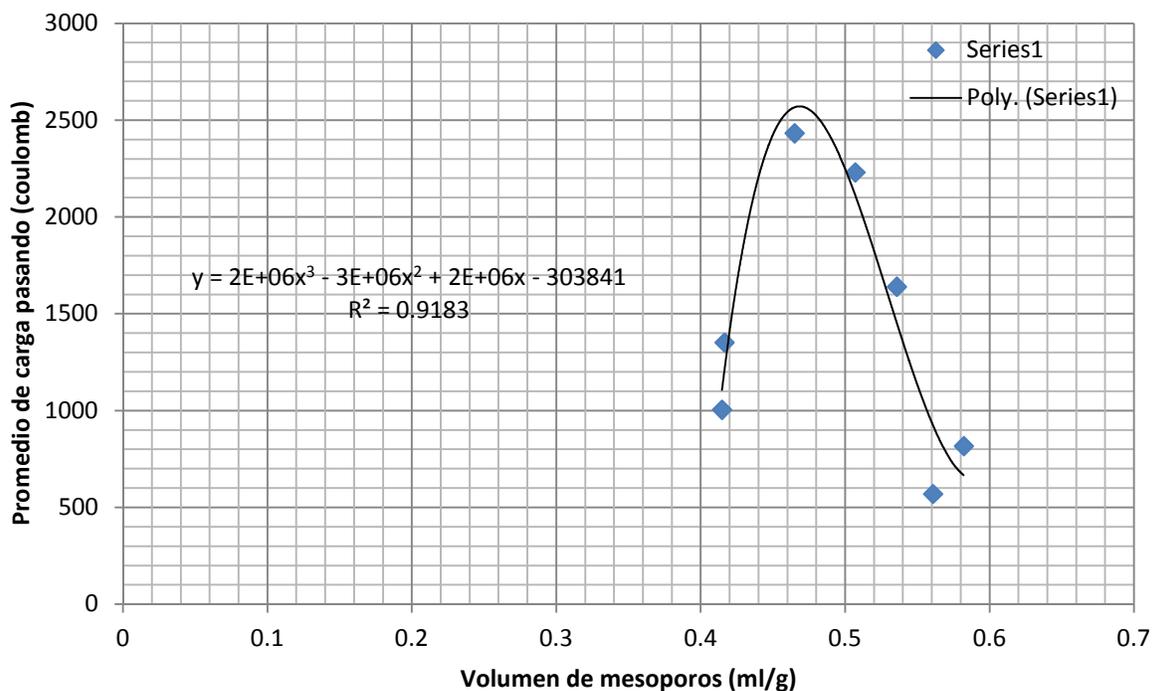


Figura 4.36: Penetración del ión cloruro basado en la carga pasando vs volumen de mercurio en mesoporos

La Figura 4.36 y la Tabla 4.14 presentan el ajuste de un modelo de regresión polinomial para la variable dependiente penetración del ión cloruro. El  $R^2 = 91.83\%$  indica que la variable volumen de mercurio en mesoporos tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la penetración del ión cloruro.

Tabla 4.14 Regresión polinomial: resistencia penetración ión cloruro a 180 días de curado

Fuente de variación	$R^2(\%)$	Ecuación del modelo ajustado
<b>Variable independiente</b>		
Volumen de mercurio en mesoporos		
Regresión múltiple	91.83%	$y = 2E+0.6x^3 - 3E+0.6x^2 + 2E+0.6x - 303841$
<b>Variable dependiente</b>		
Resistencia penetración ión cloruro		

Fuente: Elaboración propia

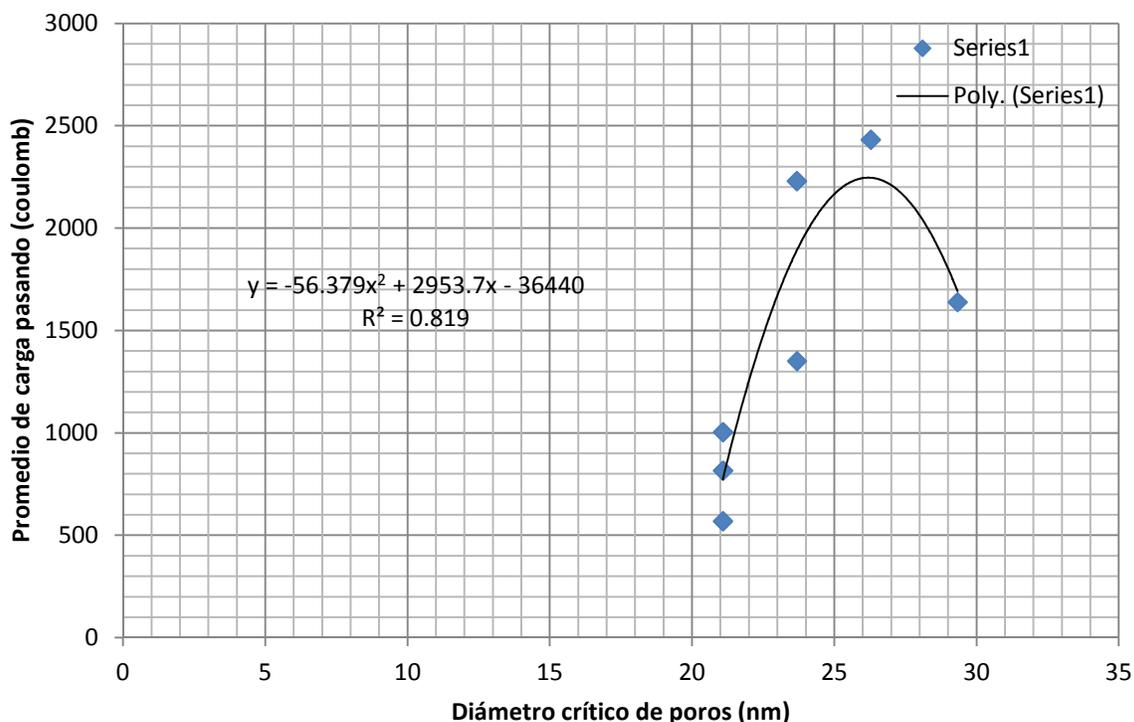


Figura 4.37: Penetración del ión cloruro basado en la carga pasando vs diámetro crítico de poros

La Figura 4.37 y la Tabla 4.15 presentan el ajuste de un modelo de regresión polinomial para la variable dependiente penetración del ión cloruro. El  $R^2 = 81.9\%$  indica que la variable diámetro crítico de poros tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la penetración del ión cloruro.

Tabla 4.15 Regresión polinomial: resistencia penetración ión cloruro a los 180 días de curado

Fuente de variación	$R^2(\%)$	Ecuación del modelo ajustado
<i>Variable independiente</i>		
Diámetro crítico de poros.		
Regresión múltiple	81.9%	$y = -56.379x^2 + 2953.7 + 0.6x - 36440$
<i>Variable dependiente</i>		
Resistencia penetración ión cloruro		

Fuente: Elaboración propia

#### 4.14.2.2 Conclusiones parciales del estadístico $R^2$ : resistencia a la penetración del ión cloruro

La resistencia a la penetración del ion cloruro en las amasadas puede ser definido por variables conocidas. Las variables son obtenidas de la composición del material, su microestructura y los componentes originales.

Se concluye que en los hormigones estudiados el volumen de mesoporos y los diámetros críticos de poros pueden definir la resistencia del material, ante la penetración del ión cloruro. El modelo puede explicar más de un 90% de la variabilidad en el comportamiento para el caso del volumen de mesoporos y más de un 80% de la variabilidad en el comportamiento para el caso del diámetro crítico.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

#### **5.1 Introducción**

En este trabajo se han estudiado los efectos de la sustitución parcial de cemento Pórtland por adiciones minerales; cenizas volantes, cenizas volcánicas y escoria de alto horno en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. Mediante esta tesis se ha desarrollado un programa experimental que tiene como objetivo aportar resultados que ayuden a comprender los efectos de las adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico como sustitutos parciales del cemento Pórtland, con el fin de determinar si la combinación de estos productos contribuyen a mejorar la calidad de los hormigones.

Los hormigones fueron estudiados bajo un amplio campo de ensayos que incluyen la durabilidad en términos de la resistencia a la penetración del ión cloruro, las propiedades mecánicas y las propiedades físicas mediante el análisis de su microestructura.

Este capítulo presenta conclusiones de la investigación desarrollada, proponiendo trabajos futuros dentro del marco de adiciones minerales como sustituto parcial del cemento Pórtland.

## 5.2 Conclusiones propiedades mecánicas: Resistencia a compresión

Las conclusiones fueron clasificadas de acuerdo al plan de trabajo, que consiste en mezclas con una adición mineral y mezclas con dos adiciones minerales.

### 5.2.1 Escoria de alto horno

- Los hormigones que emplean escoria presentan los más altos valores de todos los hormigones estudiados a los (7) siete días de curado.
- Los hormigones que emplean escoria presentan mejores valores de resistencia a compresión a todas las edades estudiadas en comparación con el hormigón de referencia.
- Los hormigones que emplean escoria a partir de los 91 días no muestran una mayor ganancia de resistencia.

### 5.2.2 Cenizas volantes

- Los hormigones que emplearon cenizas volantes presentan los más bajos valores de todos los hormigones estudiados a los (7) siete días de curado.
- Los hormigones que emplearon cenizas volantes presentan los mejores valores de resistencia a compresión de todos los hormigones estudiados a partir de los 91 días de curado.

### 5.2.3 Cenizas volcánicas

- Los hormigones que emplean cenizas volcánicas presentan el segundo más alto valor de todos hormigones con adiciones a los (7) siete días de curado.
- Los hormigones que emplean cenizas volcánicas presentan mejores valores de resistencia a compresión a partir de los 28 días en comparación con el hormigón de referencia.

#### 5.2.4 Combinación de adiciones

- Las adiciones minerales empleadas, cenizas volantes, escorias de alto horno y cenizas volcánicas de la isla de Monserrat no presentan la misma velocidad de reacción y son influenciadas de forma significativa por el tiempo de curado de los hormigones.
- El empleo de combinaciones de adiciones minerales como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón puede presentar valores de resistencias a compresión igual o superiores a los de hormigones similares que no empleen adiciones minerales a partir de los 91 días de curado.

#### 5.3 Conclusiones propiedades de durabilidad: Permeabilidad al ión cloruro

- El empleo de cenizas volantes tipo *F*, en solitario o combinada con otras adiciones minerales, como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón puede presentar valores “muy bajos” de penetración del ión cloruro de acuerdo a la prueba regulada por el ASTM C1202.
- El empleo de cenizas volantes tipo *F* y escorias de alto horno como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón mejora la resistencia a la penetración del ión cloruro de forma significativa.
- El empleo de cenizas volcánicas de la isla de Monserrat como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón parece no presentar un efecto significativo en la penetración del ion cloruro.

#### 5.4 Conclusiones de propiedades físicas: Porosimetría por intrusión de mercurio

- Se confirman los resultados de investigaciones anteriores donde se relaciona la penetración del ión con características físicas del hormigón, el volumen de mesoporos y el diámetro crítico de la red porosa.
- La porosidad total interconectada mediante la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio no presentó una relación evidente con las propiedades mecánicas o la durabilidad del hormigón en términos de penetración del ion cloruro mediante el RCPT.
- En la gran mayoría de los casos el empleo de adiciones minerales, en solitario o combinaciones de ellas, como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón presenta valores de diámetro crítico y diámetro umbral menores que hormigones similares que no emplean adiciones minerales. Lo que implica un refinamiento de la estructura porosa del hormigón.

#### 5.5 Aportación al conocimiento

- El empleo de cenizas volantes tipo  $F$  como sustituto parcial del 25% del cemento Pórtland en mezclas de hormigón es una de las mejores opciones del mercado local para optimizar las mezclas de hormigón en términos de propiedades mecánicas y durabilidad, sí, no se requieren altas prestaciones antes de los 91 días de curado.
- El empleo de escorias de alto horno como sustituto parcial del 25% del cemento Pórtland en mezclas de hormigón es una de las mejores opciones del mercado local para optimizar las mezclas de hormigón en términos de las propiedades mecánicas y durabilidad, sí, se requieren altas prestaciones a edades tan tempranas como los 7 días de curado.

- El empleo de cenizas volcánicas de la isla de Monserrat como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón, mejora de forma significativa las propiedades mecánicas en términos de resistencia a compresión. Sin embargo, no contribuye, aunque en todo caso tampoco empeora, la durabilidad del material en términos de la penetración del ion cloruro.
- Se confirman las hipótesis de investigadores en términos de que una mejora en las propiedades mecánicas no implica necesariamente mejoras de las características de durabilidad.
- El empleo de combinaciones de adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de hormigón refina la estructura porosa del hormigón, incrementa los valores de resistencias a compresión y la resistencia a la penetración del ión cloruro respecto a los de hormigones similares que no empleen adiciones minerales.

Mediante esta tesis se logró el objetivo establecido de aportar resultados que ayuden a comprender los efectos de las adiciones minerales disponibles en el mercado local de Puerto Rico como sustitutos parciales del cemento Pórtland, con el fin de determinar si la combinación de estos productos contribuyen a mejorar la calidad de los hormigones.

## **5.6 Trabajos futuros**

El trabajo desarrollado en esta tesis deja abierta la puerta a posibles mejoras y complementos del estudio realizado. Como posibles líneas de investigación y trabajo futuro destacamos las siguientes:

### **5.6.1 Estudios destinados a establecer mejor comparación entre adiciones minerales.**

- Estudiar los cambios del material compuesto cuando varía sensiblemente la composición química o mineralógica de las adiciones minerales.
- Establecer la dosis mínima de cemento que optimice la activación de una dosis pre-establecida de adiciones minerales, en función de las características del cemento y de la adición considerada.
- Estudiar el efecto que producen los activadores alcalinos en la microestructura de los hormigones con adiciones minerales.
- Establecer los coeficientes de difusión en presencia de otros iones. Determinar la posible sinergia de los mismos y su relación con la microestructura porosa y la composición del cemento.

### **5.6.2 Comportamiento del material en ambientes reales.**

- Estudio de los procesos de difusión de cloruros en agua de mar, considerando la posibilidad de los procesos de succión capilar en las zonas de carrera de marea.
- Realización de una campaña experimental para estudiar la penetración natural y acelerada del dióxido de carbono de la atmósfera en el hormigón. Comparar los niveles de carbonatos en el hormigón, a fin de establecer la capacidad real de captación de CO<sub>2</sub>.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACAA, American Coal Ash Association. *Advancing the Management and Use of Coal Combustion Products*. 13 de 02 de 2011. <http://www.acaa-usa.org/> (último acceso: 13 de 02 de 2011).
2. ACI 201.2R. *Guide to Durable Concrete*. American Concrete Institute, 2001.
3. ACI 211.1. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute, 1991.
4. ACI 232.1R. *Use of Raw or Processed Natural Pozzolans*. American Concrete Institute, 2000.
5. ACI 232.2R. *Use of Fly Ash in Concrete*. American Concrete Institute, 2003.
6. ACI 233R. *Slag Cement in Concrete and Mortar*. American Concrete Institute, 2003.
7. ACI 234R. *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*. American Concrete Institute, 2006.
8. ACI ITG-4.2R. *Materials and Quality Considerations for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications*. American Concrete Institute, 2006.
9. Anwar, y M Khandaker. «Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete.» *Cement & Concrete Composites*, 2004.
10. Armero, M.M Castellote. *Aplicación de campos eléctricos para la caracterización de hormigones en relación al transporte de iones de cloruro*. Tesis doctoral, Zaragoza: Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, Universidad de Zaragoza, 1997.
11. ASTM C1202 . *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. American Society for Testing and Materials, 2009.
12. ASTM C1543 . *Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Pounding*. American Society for Testing and Materials, 2002.

13. ASTM C192. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. American Society for Testing and Materials, 2007.
14. ASTM C33. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. American Society for Testing and Materials, 2008.
15. ASTM C39. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials, 2005.
16. ASTM C618. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials, 2008.
17. ASTM D4404. *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, 2010.
18. Barnett, S.J., M.N. Soutsos, S.G. Millard, y J.H. Bungley. «Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies.» *Cement and Concrete Research*, 2005.
19. Berndt, M.L. «Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate.» *Construction and Building Materials*, 2009.
20. Binicini, Hanifi, Orhan Aksogan, Ela Bahsude, y Hasan Kaplan. «Performance of ground blast furnace slag and ground basaltic pumice concrete against seawater attack.» *Construction and Building Materials*, 2007.
21. Bouikni, A., R.N. Swamy, y A. Bali. «Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag.» *Construction and Building Materials*, 2009.
22. Bouzoubaa, N., y Fournier. «Optimization of Fly Ash Content in Concrete Part 1: Non-air-entrained Concrete Made without Super Plasticizer.» *Cement and Concrete Research* (Cement and Concrete Research), 2002: 33, 1029-1037.
23. CEB. *Durabilidad de las Estructuras de Hormigón: Guía de diseño Comité Euro-Internacional du Béton*. Madrid: Grupo Español del Hormigón, 1993.
24. Chalee, W., P. Ausapanit, y C. Jaturapitakkul. «Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis.» *Materials and Design*, 2009.
25. Conceptos Básicos en Estadística. *e-biometria*. 2008. [http://www.e-biometria.com/conceptos\\_basicos/conceptos\\_basicos.htm](http://www.e-biometria.com/conceptos_basicos/conceptos_basicos.htm) (último acceso: 15 de 05 de 2008).
26. Diamon, S. «Methodologies of PSD measurements in HPC: postulates, peculiarities and problems.» *Pore Structure and permeability of cementitious materials*, Warrendale, PA, 1989.

27. Diamond, S. «Mercury Porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials.» *Cement and Concrete Research*, 2000: 1517 - 1525.
28. Edel'man L.I., Sominskii, D.S. y Kopchicova, N.V. «Pore size distribution in cement rocks.» *Colloid Journal* 23, 1961: 192-196.
29. Elahi, A, P.A.M Basheer, S.V Nanukuttan, y Q.U.Z Khan. «Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials.» *Construction and Building Materials*, 2009: 1-2.
30. Ergul, Yasa, Duran Atis Cengiz, Kilic Alaettin, y Gulsen Hasan. «Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash.» *Materials Letters*, 2003.
31. Fajardo, G., P. Valdez, y J. Pacheco. «Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides.» *Construction and Building Materials*, 2008.
32. Fernandez Cánovas, Manuel. «Hormigón.» (Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos) 2004.
33. Fernández, M. Cánovas. «Patología y Terapéutica del Hormigón Armado.» (Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos) 1994.
34. Ferreira, C., A. Ribeiro, y L. Ottosen. «Possible applications for municipal.» *Journal of Hazardous Materials*, 2002.
35. GNS Science Te Pū Ao. 02 de 03 de 2011. <http://www.gns.cri.nz> (último acceso: 02 de 03 de 2011).
36. Hossain, K.M.A., y M. Lachemi. «Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar.» *Cement and Concrete Research*, 2003.
37. Hossain, y Khandaker M. Anwar. «Blended cement using volcanic ash and pumice.» *Cement and Concrete Research*, 2003.
38. Isaia, G. C. «High-performance concrete for sustainable constructions.» *Waste Materials in Construction*, 2000: 344-354.
39. Kaid, N., M. Cyr, S. Julien, y H. Khelafi. «Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach.» *Construction and Building Materials*, 2009.
40. Khandaker, M., y Anwar. «Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete.» *Cement and Concrete Research*, 2003.
41. Khandaker, M.A., Mohamed Lachemi, y Mustafa Sahmaran. «Performance of cementitious building renders incorporating natural and industrial pozzolans under aggressive airborne marine.» *Cement & Concrete Composites*, 2003.

42. Lachemi, M., y K.M.A. Hossain. «Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete.» *Cement and Concrete Research*, 2007.
43. Le Bellego, C., B. Gérald, y G. Pijaudie-Cabot. «Chemo-mechanical effects in mortars beams subjected to water hydrolysis.» *Journal of Engineering Mechanics*, 2000: 126(3), 266-272.
44. Lorenzo, Ma. P., S. Goñi, y A. Guerrero. «Role of aluminous component of fly ash on the durability of Portland cement-fly ash pastes in marine environment.» *Waste Management*, 2003.
45. Mehta, P.K. *Advancements in Concrete Technology*. Concrete International: Design & Construction, 21 (6), 69-76, 1999.
46. Molina-Bas, Omar. *Influencia de las Cenizas Volantes como Sustituto Parcial del Cemento Portland en la Durabilidad del Hormigón*. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, 2008.
47. Montgomery, D. C., y G. C. Runger. «Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería.» *Ciudad de México: Noriega Editores*, 2002.
48. Montgomery, Douglas C., Elizabeth A. Peck, y Geoffrey G. Vining. *Introduction to linear regression analysis*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
49. Papadakis, V.G., y S. Tsimas. «Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design.» *Cement and Concrete Research*, 2002.
50. Peurifoy, R. L., W. B. Ledbetter, y C.J. Schexnayder. *Construction, Planning, Equipment, and Methods*. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1996.
51. Products, Advancing the Management and Use of Coal Combustion. *Advancing the Management and Use of Coal Combustion Products*. 13 de 02 de 2011. (último acceso: 13 de 02 de 2011).
52. RILEM\_TC-116-PCD. «Recommendation of TC 116-PCD: Test for gas permeability of concrete .» *Materials and Structures*, 32 (217), 1999: 174-179.
53. Roy, D.M. «Relationship between permeability, porosity, diffusion and microstructure of cement pastes, mortars, and concrete at different temperature.» *Pore Structure and permeability of cementitious materials, Warrendale, PA* , 1989.
54. Saraswathy, Velu, y Ha-Won Song. «Electrochemical studies on the corrosion performance of steel embedded in activated fly ash blended concrete.» *Electrochimica Acta*, 2006.
55. Topu, Iker Bekir, y Ahmet Raif Bog. «Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete.» *Materials and Design*, 2010.
56. UNE 80300:. *Recomendaciones para el uso de los cementos*. Asociación Española de Normalización y Certificación, 2000 IN.

57. United Kingdom Quality Ash Association. *http://www.ukqaa.org.uk*. 13 de 02 de 2011. (último acceso: 13 de 02 de 2011).
58. Vedalakshmi, R., K. Rajagopal, y N. Palaniswamy. «Longterm corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition.» *Construction and Building Materials*, 2006.
59. Washburn, E.W. «Note on a method of determining the distribution of pore size in a porous material.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 7, 1921: 115-116.
60. Wong, Y.L., L. Lama, C.S. Poona, y F.P. Zhou. «Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces.» *a Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University*, 2000.