



CONCRETOS HÍBRIDOS DURABLES Y SUSTENTABLES, CON CONTENIDOS DE CENIZA VOLANTE

Mariela Rendón Belmonte
Miguel Martínez Madrid
Rosa Verónica Martínez Pérez
Maura Arroyo Olvera

Publicación Técnica No. 559
Sanfandila, Qro, 2019

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Concretos híbridos durables y sustentables, con
contenidos de ceniza volante**

Publicación Técnica No. 559
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Mariela Rendón Belmonte, el Dr. Miguel Martínez Madrid, la Ing. Rosa Verónica Martínez Pérez y la Ing. Maura Arroyo Olvera.

Esta investigación, es el producto final del proyecto de investigación interna EI 22/18: Concretos híbridos durables y sustentables, con contenidos de ceniza volante activada y cemento portland tipo CPC.

Contenido

Índice de figuras		v
Sinopsis		vii
Abstract		ix
Resumen	Ejecutivo	xi
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	9
Capítulo 3.	Resultados	17
Capítulo 4.	Conclusiones	25
Bibliografía		27

Índice de figuras

Figura 2.1	Mapeo químico del cemento portland tipo CPC.	9
Figura 2.2	Micrografía de la ceniza volante utilizada en las mezclas de concreto.	10
Figura 2.3	Mapeo químico de la ceniza volante utilizada en las mezclas de concreto.	10
Figura 2.4	Condición húmeda en la que se mantuvieron las muestras de concreto.	11
Figura 2.5	Ensayo de VPU: a) equipo VPU con respectivas conexiones, b) posición de los transductores en la muestra, y c) determinación de la velocidad de pulso.	12
Figura 2.6	Prueba de Resistividad Eléctrica: a) verificación del equipo b) conexión de cables a equipo y placas de cobre, y c) medición de resistencia eléctrica.	13
Figura 2.7	Muestra de concreto colocada al vacío	14
Figura 2.8	Conexión de celdas a equipo de permeabilidad.	14
Figura 2.9	Software PROOVE it para ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro.	15
Figura 2.10	Máquina servo hidráulica utilizada para los ensayos de resistencia a la compresión.	15
Figura 3.1	Valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los tres concretos evaluados a diferentes edades.	17
Figura 3.2	Valores de resistividad eléctrica (ρ) de los tres concretos evaluados a diferentes edades.	18
Figura 3.3	Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro de los tres concretos: MA, MB y MC.	19
Figura 3.4	Resistencias mecánicas obtenidas por un período de 360 días.	20

Figura 3.5	Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 360 días.	21
Figura 3.6	Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 360 días.	22
Figura 3.7	Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 28, 56, 90, 122 y 300 días.	23

Sinopsis

Esta investigación presenta resultados de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a diferentes edades de mezclas de concreto portland tipo CPC 40 y diferentes contenidos de ceniza volante activada. Los resultados indican que el contenido de ceniza volante activada en las mezclas afecta positivamente el desarrollo de la resistividad eléctrica, baja permeabilidad al ión cloruro y resistencias mecánicas a la compresión. Tales propiedades de los concretos permiten considerarlos como un desarrollo sostenible para la industria de la construcción, ya que contribuyen con la disminución en el uso de cementos portland y la consecuente reducción en la emisión de dióxido de carbono. Además de enriquecer la información de comportamiento a edades superiores a los 360 días.

Abstract

This research presents results of ultrasonic pulse velocity (VPU), apparent electrical resistivity (ρ), rapid permeability to chloride ion and mechanical strength at different ages of portland concrete mixtures type CPC 40 and with different contents of activated fly ash. The results indicate that the activated ash content in the mixtures positively affects the development of electrical resistivity, low permeability to the chloride ion and mechanical resistance to compression. Such concrete properties allow them to be considered as a sustainable development for the construction industry, contributing to the decrease in the use of portland cements and the consequent reduction in the emission of carbon dioxide. In addition, to enriching the information at ages higher than 360 days.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se evaluó el comportamiento de mezclas de concreto fabricadas con distintos contenidos de ceniza volante activada y cemento portland tipo CPC, con el objetivo de valorar propiedades tales como: calidad del concreto, resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a diferentes edades. Los resultados alcanzados indican que mezclas con contenidos de ceniza volante activada favorecen la durabilidad de los concretos.

Este trabajo, además de la introducción, se compone de cuatro capítulos que son descritos brevemente a continuación:

Capítulo 1: Presenta una revisión bibliográfica de trabajos reportados del uso de la ceniza volante en estructuras de concreto.

Capítulo 2: Describe brevemente la metodología seguida para la fabricación de las mezclas y probetas evaluadas.

Capítulo 3: Presenta los resultados y la discusión de estos haciendo un comparativo, en función de la mezcla de concreto obtenida con 100% de cemento portland tipo CPC.

Capítulo 4: Este capítulo presenta las conclusiones logradas en el estudio.

Introducción

En los países industrializados, el uso del carbón mineral como fuente de energía primaria para la generación de electricidad se remonta a las primeras décadas de este siglo, y la utilización en el concreto de las cenizas resultantes de esta aplicación se practica desde los años cincuenta [1]. La ceniza volante es un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible, para producir energía eléctrica. Su primera utilización como adición mineral fue alrededor de 1930; sin embargo, su uso de manera industrial se llevó a cabo hasta 1950, llegando a reemplazar hasta un 35% en peso de cemento. En 1979, la ceniza volante era utilizada aproximadamente en un 35% por compañías de concreto premezclado, de los EE.UU. [2].

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) empleó por primera vez el carbón mineral -con esta finalidad- en la Planta Termoeléctrica de Nava, en el Estado de Coahuila; la que funcionó principalmente con carácter experimental entre 1964 y 1977. En 1978, la CFE comenzó a construir en la misma región una nueva central carboeléctrica proyectada para funcionar con cuatro unidades de 300 000 kW cada una, consumiendo carbón mineral procedente de los cercanos yacimientos de Río Escondido, Coahuila, explotados por la empresa Minera Carbonífera Río Escondido, S. A. (MICARE) de participación estatal. En 1985, esta central, con dos unidades, producía alrededor de 2 000 toneladas diarias de cenizas; cifra que en este año -según estimaciones- debería incrementarse a 4 000 toneladas diarias, hacia finales de 1986. Considerando la magnitud del valor potencial que representaban estas cenizas, desde entonces fue justificada ampliamente la divulgación de sus propiedades y posibles aplicaciones entre las que destaca su empleo como componente del concreto. La CFE promovió la elaboración de un cemento portland-puzolana elaborado mediante la molienda conjunta de un Clinker Portland tipo II y ceniza volante integral de Río Escondido. Este cemento fue utilizado en la construcción de la Planta Hidroeléctrica de Peñitas, en el Estado de Chiapas, dado que presentó características físicas y químicas que satisficieron ampliamente los requisitos inherentes a su clase [1].

Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad tiene en la ciudad de Nava, Coahuila dos de sus centrales Carboeléctricas más importantes del país: la Central Termoeléctrica José López Portillo y la Central Termoeléctrica Carbón II. Aunque cabe mencionar que existe la Central Termoeléctrica Petacalco, formalmente llamada como la Central Termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles, ubicada en el municipio de La Unión de Isidoro Montes de Oca, Guerrero, que inició operaciones el 18 de noviembre de 1993; esta es una central dual que opera con carbón y petróleo.

Al día de hoy el material de construcción que predomina es el cemento portland. De acuerdo con la CANACEM (Cámara Nacional del Cemento) en México, en el 2016, la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas equivalente a ~ 40.6 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) que se liberaron al medio ambiente, y un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas.

Considerando la disponibilidad hoy de la ceniza volante en nuestro país y el impacto ambiental por la generación de dióxido de carbono (CO₂) causada por la producción del cemento portland, esta investigación valora propiedades referentes a la durabilidad de tres mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada, con el objetivo de impulsar el uso de materiales disponibles en México; sustentables, económicos y que reduzcan el consumo de materias primas naturales (como en el caso de la producción de cemento) en estructuras de concreto. Además de contribuir con información científica a largo plazo.

I.1 Objetivos

1. Investigar la viabilidad de la ceniza volante activada, como alternativa sustentable, durable y económicamente competitiva; o como material sustituto de cemento portland en mezclas de concreto.

1 Antecedentes

A principios de los años sesenta, muchos países empezaron a incorporar ceniza volante en el concreto, como material puzolanico que podía ser usado como un componente de mezclado del cemento portland, o como un mineral de adición en el concreto. Sustituir cemento con ceniza volante en el diseño de mezcla de concreto ha demostrado varios beneficios: 1) el reemplazo de cemento por ceniza volante incrementa el “cuidado ambiental” y disminuye el calor de hidratación así como el costo del material, 2) la adición de ceniza volante puede mejorar la durabilidad y reduce la contracción por secado, y 3) la morfología y microagregados por efecto de partículas de ceniza volante ofrecen mejor trabajabilidad, mayor compactación en la zona de transición interfacial y una estructura de poro más fina en el sistema [3].

Estas son algunas investigaciones reportadas sobre el uso de la ceniza volante:

Malhotra [4] evaluó los aspectos de durabilidad en concretos con sustitución parcial de ceniza volante, de un 54 a 58% del total de la masa cementicia. Los resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) resultaron mayores a 4000 m/s, los valores de resistencia a la compresión a 28 días resultaron del orden de 40 MPa. En cuanto a la prueba de permeabilidad a 91 días, obtuvo baja permeabilidad con resultados del rango de 190 Coulombios. El autor señala que las reacciones álcali-agregado en el concreto pueden ser controladas usando ceniza volante, además de disminuir el calor de hidratación y el contenido de cemento en las mezclas de concreto.

Alvarez et. al., [5] estudiaron la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento de dos maneras: 1) en su estado de recepción original y 2) tamizada por tamiz de 75 μm . Reportan que cuando el porcentaje de sustitución es mayor al 10%, la absorción es menor respecto a la muestra sin ceniza volante (0%); en cuanto al ensayo de resistencia a la compresión, reportan que a edades tempranas se retrasa su desarrollo, pero a partir de los 28 días presentan una evolución similar a la muestra sin ceniza volante (0%). Reportan que obtuvieron los mejores resultados con un 20% de sustitución de ceniza volante.

Molina et. al., [6] estudiaron la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial de cemento portland, en el aspecto de durabilidad, empleando porcentajes del 0, 15 y 35%. Los resultados mostraron que el uso de la ceniza volante desfavorece la difusión de dióxido de carbono (CO_2) en el concreto a los 28 y 56 días, debido al contenido de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conocido también como portlandita. En la prueba de penetración del ión cloruro reportan que al aumentar el contenido de la ceniza volante la penetración de este ión se redujo debido a la

disminución de porosidad producida por la ceniza volante. Mencionan que el mejor comportamiento lo presentaron los concretos con un contenido del 15% de ceniza volante.

Garcés et. al., [7] investigaron la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento portland, en morteros y concretos. Estos autores aplicaron dos pretratamientos a la ceniza volante: 1) molienda durante 60 minutos con separación magnética y 2) molienda durante 60 minutos sin separación magnética. La separación magnética se refiere a un sistema que separa el hierro de las cenizas volantes. Los resultados indicaron que el mortero con ceniza volante (CV) sometida a molienda y con separación magnética mantuvo al acero de refuerzo pasivado durante todo el estudio.

Uysal y Akyuncu [8] investigaron el efecto del uso de la ceniza volante clase C y F como reemplazo parcial del cemento en porcentajes del 0,10,15,17, 20, 25.5 y 34%. Evaluaron la resistencia mecánica, resistencia a la permeabilidad al ión cloruro y sortividad. Los resultados de resistencia a la compresión a 90 días, con un 20% de ceniza volante, resultaron del orden de 70 MPa con ambos tipos de ceniza volante. Para la prueba de permeabilidad al ión cloruro el valor más bajo de penetración, obtuvieron con un 34% de ceniza volante tipo F y con un 25.5% de ceniza tipo C. La sortividad de los concretos decreció con el incremento de la ceniza volante.

Sanytsky et. al., [9] investigaron el efecto de las cenizas volantes ultra finas sobre las propiedades de los materiales cementantes. Reportan que la ceniza volante reaccionó más intensamente con el hidróxido de calcio del cemento, debido a la gran cantidad de fracciones activas y al tamaño ultra fino de la ceniza.

Madhavi et. al., [10] reportan que el alto volumen de ceniza volante como reemplazo de cemento en mezclas de concreto mejora la durabilidad debido a la reducción de hidróxido de calcio; a largo plazo, la permeabilidad de estos concretos es muy baja (91 días mostraron un valor menor a 500 coulomb respecto a un concreto convencional que resultó de 2000 coulombios). Reportan también que el calor de hidratación se reduce cuando el reemplazo de cemento por ceniza volante es del 50%; para reemplazos menores del 40%, la resistencia a la compresión es alta a los 28 días; y con contenido mayor al 40%, el incremento de la resistencia es progresivo.

Saha [11] evaluó la aplicación de la ceniza volante tipo F como reemplazo parcial en porcentajes del 10, 20, 30 y 40% del cemento en concretos evaluados a 7, 28, 56, 90,180 y 360 días. Reporta que los concretos sin ceniza volante, a los 7 días de curado alcanzaron resistencia a la compresión superiores respecto a los concretos con ceniza volante; menciona que la falta de contenido de óxido de calcio (CaO) en las mezclas de concreto conlleva a obtener bajas resistencias a la compresión a los 7 días; pero conforme el transcurso del tiempo, los valores incrementan. En el caso de la permeabilidad, reporta que disminuyó conforme aumentó la cantidad de ceniza volante.

Sin embargo, aun con la información reportada sobre los beneficios que proporciona el uso de la ceniza volante, a escala mundial el cemento Portland representa más de 80% del total de cemento producido; a pesar de las alternativas probadas que conllevan beneficios económicos adicionales y menos carga ambiental.

Las principales barreras identificadas para promover su uso, de acuerdo con el trabajo recabado por Vargas y Halog [12], son:

- 1) El rendimiento de los cementos basados en ceniza volante es todavía medido en términos de resistencias a la compresión en 28 días; aunque, las resistencias a la compresión con el paso del tiempo incrementan añadiendo un beneficio significativo a largo plazo del uso de ceniza volante en mezclas de cemento y concreto. Esto es particularmente importante porque los fabricantes de cemento tradicionales pueden tomar decisiones basadas solo en datos a corto plazo, es por ello que la disponibilidad de datos de rendimiento a largo plazo de los cementos que contienen ceniza volante son cruciales para que los fabricantes de cemento puedan informarse sobre los beneficios del potencial económico y medioambiental de incorporar ceniza volante en sus cementos. La disponibilidad de información adecuada permitiría a las empresas hacer uso de grandes cantidades de ceniza volante y generalizar.
- 2) La comunicación entre las empresas es otra barrera que impide la expansión de un uso más amplio de la ceniza volante. Se subraya la relevancia de crear simbiosis industriales cuando el objetivo es reducir el CO₂. Debido a la naturaleza de los procesos industriales involucrados, la industria del cemento tiene la versatilidad de intercambiar múltiples flujos de material y energía desde y hacia otras industrias que también buscan colaboración. Sin embargo, las empresas de dosificación y los usuarios individuales a menudo son reacios a incorporar estas técnicas, generalmente porque requieren tiempo, recursos y costos adicionales.
- 3) Las limitaciones técnicas, en algunas aplicaciones el curado del concreto se convierte en un desafío cuando son usados los cementos de ceniza volante; dado que existen informes que indican que las resistencias a la compresión a largo plazo dependen directamente de las técnicas de curado precisas de los concretos que contienen ceniza volante.
- 4) Existe normativa que describe las características físicas y químicas (entre ellas la finura), clasificación de las cenizas que determinan el porcentaje de uso de ceniza volante. Conforme a literatura disponible, este límite se ha establecido en un 35%, porcentaje asociado básicamente a que la ceniza volante no puede mejorar las características de resistencia en su forma natural cuando es usada más allá de este reemplazo [13,14]. Es por ello que si una ceniza no cumple con estas especificaciones, su uso ha sido

descartado. La finura de la ceniza volante es considerada como la variable más importante e influyente en la mejora y normalización.

- 5) Otro aspecto cuestionable es la energía requerida en algunos métodos para alcanzar la adecuación o mejora de la ceniza volante. De acuerdo con resultados de simulación del uso de la ceniza volante, las reducciones máximas de emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de cemento son menores cuando esta es utilizada sin tratamientos adicionales que implican gastos de energía; sin embargo, debido a que las cenizas volantes almacenadas (causada por falta de aplicación) no satisfacen los estándares de calidad del cemento, se requieren procesos de mejora.

Con el objetivo de alcanzar el cumplimiento con los requisitos estipulados en la normativa y promover una sustitución de porcentajes mayores a los estipulados, se han considerado diferentes métodos para mejorar sus características, tales como [12,15,16,17,18]:

- Colección y clasificación de cenizas: este método consiste en la separación física de las cenizas, por tamaño de partícula y calidad de ceniza. Esto permite utilizar cenizas de alta calidad en aplicaciones de alta tecnología.
- Molienda fina y ultrafina: la molienda de ceniza volante aumenta el área superficial, por lo tanto, mejora sus propiedades puzolánicas. Estas tecnologías pueden reducir el tamaño de partícula incluso $< 10 \mu\text{m}$, pero a expensas de cantidades considerables de energía. Los procesos actuales requieren aproximadamente 0,75 GJ por tonelada de material procesado y las inversiones iniciales son altas, por lo que es poco atractivo para potenciales inversionistas y compañías en el campo. Sin embargo, estas tecnologías son prototipos y las salidas están en escala piloto.
- Tratamientos físicos: los precipitadores electrostáticos son utilizados para recolectar las cenizas finas y suelen ser parte de los sistemas de eliminación de polvo en las centrales eléctricas. La ceniza volante recolectada a través de precipitadores electrostáticos se usan principalmente en cementos de alto rendimiento, aunque la cantidad producida es baja y existe un uso sustancial de energía. El consumo de energía de los precipitadores electrostáticos está entre 0.01 kwh/ m³ para pequeños precipitadores y 0.176 kwh/m³ para unidades grandes.
- Recombustión: la recombustión sirve para eliminar el carbón sin quemar que podría perjudicar las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes. Este proceso consiste en agregar cenizas a la mezcla de carbón cuando se pulveriza. Ha sido probado que la cantidad de carbono sin quemar en las muestras de carbón disminuye considerablemente, cuando se mezcla carbón con cenizas que contienen carbono sin quemar. Además de que al lograr temperaturas más altas con menos combustibles primarios, mejora la eficiencia y se reducen las emisiones.

- Activación química: consiste en agregar activadores químicos que ocasionan que la ceniza volante reaccione como un agente cementoso o puzolánico.

Considerando estos métodos y diversos estudios sobre propiedades de concretos con diferentes cantidades de ceniza volante, la información sobre propiedades referentes a la durabilidad aún es poca; por ello, esta investigación se centra en determinar propiedades tales como: calidad del concreto (VPU), resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a diferentes edades por un período de 450 días de tres mezclas con diferentes cantidades de ceniza volante tratada química y mecánicamente.

2 Metodología experimental

El desarrollo experimental realizado en esta investigación consistió en fabricar y monitorear muestras de concreto, a partir de ceniza volante activada y cemento portland tipo CPC; hidratados con agua potable y curado seguido hoy en día para muestras de concreto tradicional. Se fabricaron dos mezclas con contenidos de sustitución de ceniza volante del 50 y 65%; y como referencia, se fabricaron muestras de Cemento Portland tipo CPC (100%). El monitoreo consistió en obtener la calidad del concreto (VPU), resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión a diferentes edades durante un período de casi 450 días.

2.1 Materiales de partida

Para la elaboración de las mezclas de concreto, se utilizó cemento portland tipo CPC marca comercial, ceniza volante activada mediante el uso de adiciones químicas y molienda mecánica (CVA) y agregados producto de la trituración de roca caliza. En la figura 2.1 aparece un mapeo químico del cemento portland obtenido por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Energía Dispersiva (EDS). Los componentes principales hallados fueron Calcio y Silicio.

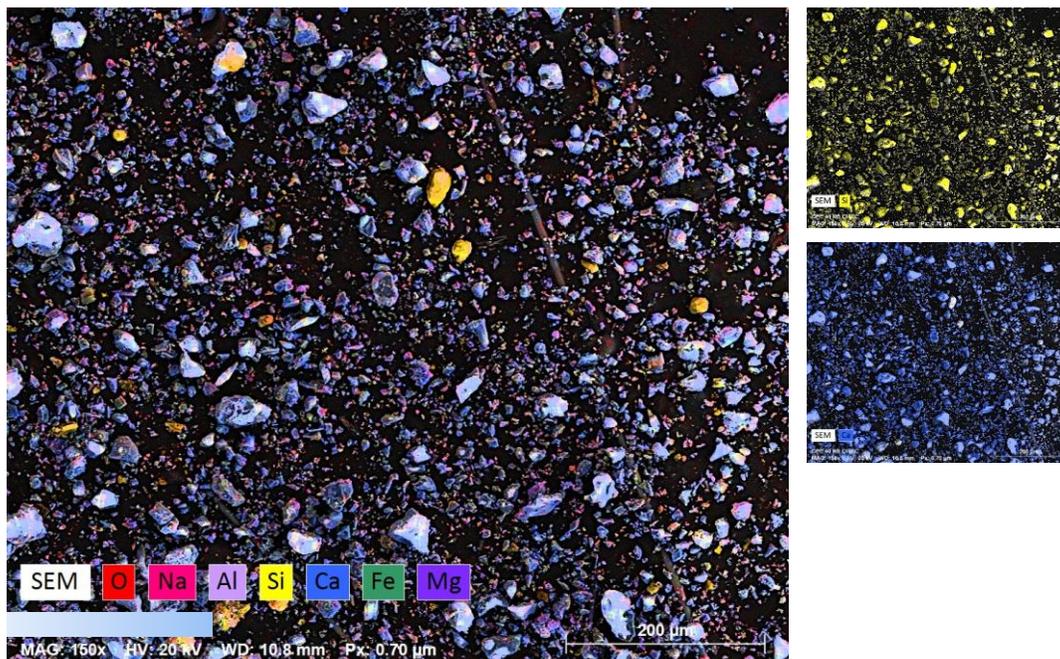


Figura 2.1. Mapeo químico del cemento portland tipo CPC.

La figura 2.2 muestra una micrografía de la ceniza volante utilizada para la fabricación de las mezclas, donde se observa la variabilidad de tamaño de las partículas de ceniza volante.

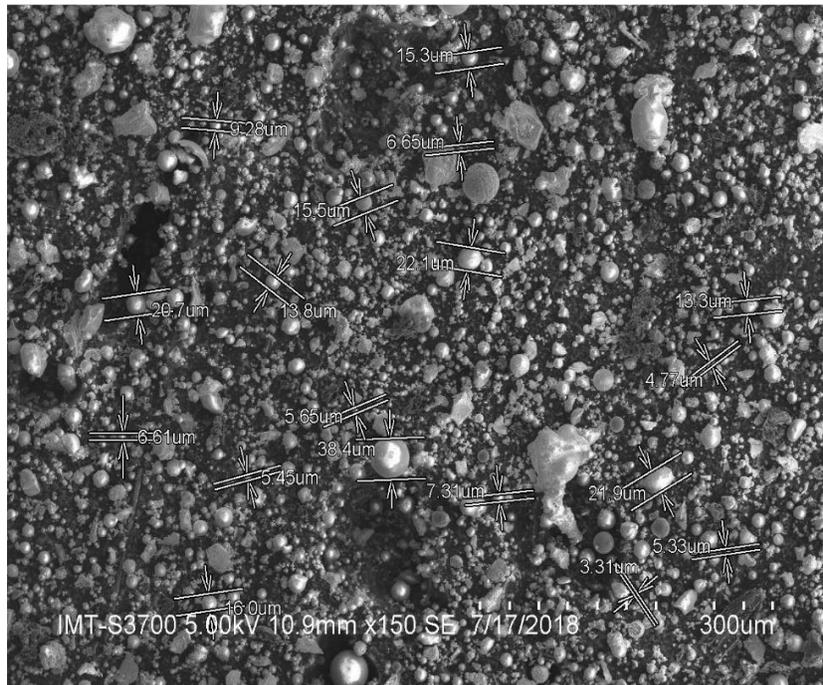


Figura 2.2. Micrografía de la ceniza volante utilizada en las mezclas de concreto.

Se obtuvo también un mapeo químico de la ceniza volante donde se observó presencia de: Silicio, Aluminio, Calcio, Hierro, Carbono y Azufre como muestra la figura 2.3.

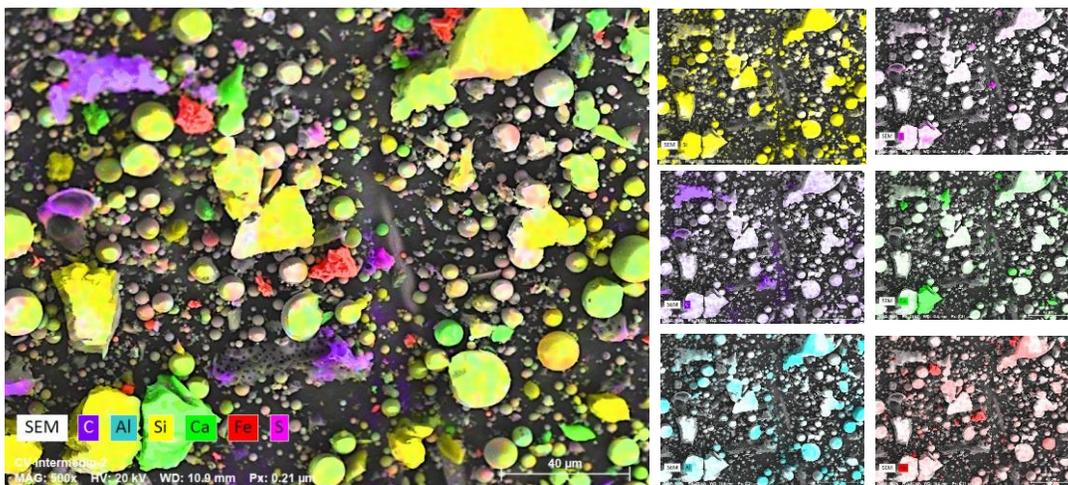


Figura 2.3. Mapeo químico de la ceniza volante utilizada en las mezclas de concreto.

2.2 Fabricación de muestras de concreto

Cabe mencionar que la incorporación de la ceniza volante activada con el cemento portland se realizó en la olla mezcladora de concreto, previo a la fabricación de la mezcla correspondiente.

Se obtuvieron tres mezclas denominadas: MA, MB y MC con porcentajes de sustitución de ceniza volante activada del 0, 50 y 65% respecto al peso de cemento y relación agua/material cementante= 0,35. De cada mezcla se obtuvieron 57 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud, fabricados de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-159 [19], hidratadas con agua potable del suministro municipal y curado conforme a la norma NMX-C-148 [20]. Posterior al período de curado (28 días), todas las muestras fueron rociadas de manera periódica con agua potable y mantenidas a temperatura ambiente, en un contenedor cubierto con plástico y con su respectiva tapa; como muestra la figura 2.4.



Figura 2.4. Condición húmeda en la que se mantuvieron las muestras de concreto.

2.3. Ensayos de prueba

Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) [21,22], resistividad eléctrica (ρ) [21,23], permeabilidad rápida al ión cloruro [24] y resistencia mecánica a la compresión [25,26]; a diferentes edades y por un período de 450 días.

2.3.1 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Este ensayo se realizó con la finalidad de verificar la homogeneidad del concreto o detectar presencia de vacíos que pudieran ser generados durante la fabricación de las muestras. El equipo utilizado fue UPV E48 (Ultrasonic Pulse Velocity Test). El ensayo consistió en conectar los cables del equipo a cada uno de los transductores, aplicar en cada uno de los extremos de la muestra gel antibacterial

y, posteriormente, en los transductores. El principio del equipo es arrojar un valor de tiempo en μs y posteriormente este valor se convierte a m/s considerando la distancia en (m) y el tiempo de tránsito en (s) de acuerdo con la fórmula: $V = l/t$ donde: $V =$ Velocidad de pulso, m/s ; $l =$ Distancia entre las caras, en metro y $t =$ tiempo en segundos.

La figura 2.5 muestra el procedimiento seguido para realizar este ensayo.



Figura 2.5. Ensayo de VPU: a) equipo VPU con respectivas conexiones, b) posición de los transductores en la muestra, y c) determinación de la velocidad de pulso.

2.3.2 Resistividad eléctrica (ρ)

Este ensayo fue realizado con el equipo Nilsson Model 400 Soil Resistance Meter. En cada medición se colocaron esponjas previamente humectadas con agua de grifo, en los extremos de cada probeta, para después colocar una placa de cobre. El equipo adquiere la resistencia eléctrica, valor que después se convierte en resistividad eléctrica, en función del área del cilindro, a partir de la fórmula $\rho = R(A/a)$ donde: R es la resistencia en ohms (Ω); A es el área de sección transversal en cm^2 y a es la longitud de la muestra en cm.

El procedimiento seguido se aprecia en la figura 2.6.

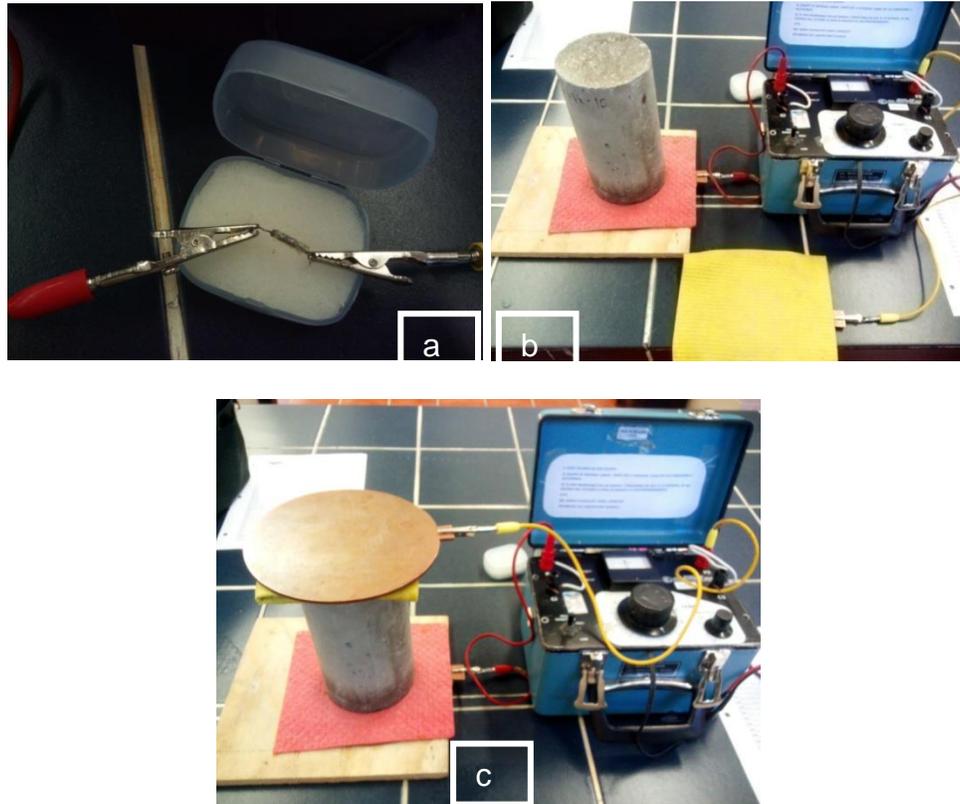


Figura 2.6 Prueba de Resistividad Eléctrica: a) verificación del equipo, b) conexión de cables a equipo y placas de cobre, y c) medición de resistencia eléctrica.

2.3.3 Permeabilidad rápida al ión cloruro

Para esta prueba fue necesario obtener de cada cilindro por ensayar, 2 rodajas de 5 cm de espesor x 10 cm de diámetro con el apoyo de una cortadora de concreto; rodajas que fueron colocadas en vacío durante 3 horas; posterior a este tiempo, se incorporó agua descarbonatada en el desecador y se dejó por 1 hora más en vacío, como muestra la figura 2.7. Al término de este tiempo, se apagó la bomba de vacío y las muestras se dejaron en reposo por un período de 18 horas \pm 2 horas. Finalizado este tiempo, se colocaron las rodajas en las celdas con solución de cloruro de sodio (NaCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para conectar al equipo de permeabilidad (figura 2.8). El software empleado fue PROVEE it y la duración de la prueba fue de 6 horas (figura 2.9). El dato obtenido de esta prueba fue la carga en Coulombios (C), que posteriormente fue interpretado de acuerdo con la norma ASTM C1202 [24].



Figura 2.7 Muestra de concreto colocada al vacío.



Figura 2.8 Conexión de celdas a equipo de permeabilidad.

	1	2	3	4	5	6	7
Status:	FIN	FIN	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Voltage-Actual:	60.0	60.0	----	----	----	----	----
Current-Actual:	10.6	12.2	----	----	----	----	----
Temperature:	19	20	---	---	---	---	---
Elapsed Time:	6:00	6:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Pred.	184	219	---	---	---	---	---
Testing time:	6h						
Specimen Diameter:	100 mm						
	184	219	---	---	---	---	---
	V.Low	V.Low	---	---	---	---	---

Figura 2.9 Software PROOVE it para ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro.

2.3.4 Resistencia mecánica a la compresión

La resistencia mecánica a la compresión se obtuvo a edades de 3, 7, 14, 28, 56, 90 y 360 días. Se utilizó una máquina servohidráulica marca INSTRON, como muestra la figura 2.10.



Figura 2.10 Máquina servohidráulica utilizada para los ensayos de resistencia a la compresión.

3 Resultados

3.1 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

La figura 3.1 muestra el promedio de valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) obtenido a partir de mediciones de 20 cilindros de cada mezcla de concreto evaluada.

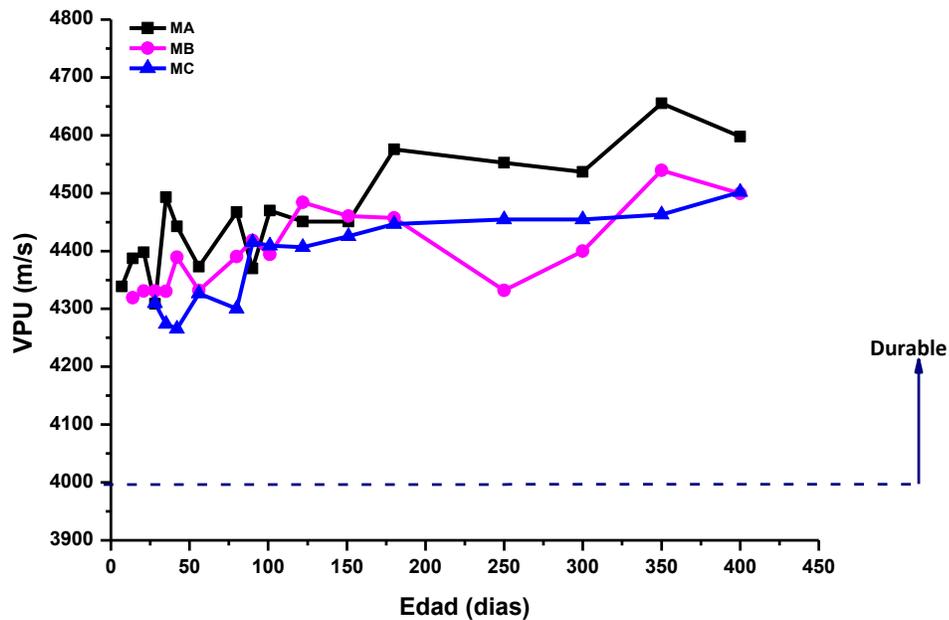


Figura 3.1. Valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los tres concretos evaluados a diferentes edades.

De acuerdo con la figura 3.1, las tres mezclas en todas las edades de medición superaron los 4000 m/s; valor considerado para un concreto de calidad durable con base en el criterio reportado en el Manual de la Red DURAR [21].

3.2 Resultados de resistividad eléctrica (ρ).

La figura 3.2 presenta el promedio de la resistividad eléctrica (ρ) obtenida a partir de mediciones realizadas de 20 cilindros de cada mezcla de concreto, la condición de medición fue húmeda; condición que de acuerdo con la norma mexicana NMX-C514 se refiere a la resistividad eléctrica aparente [23].

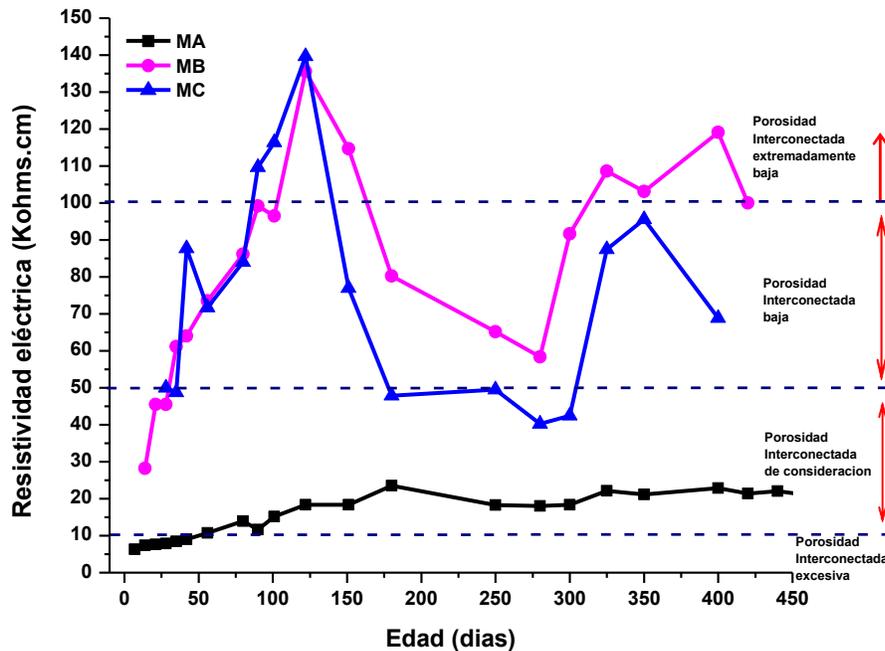


Figura 3.2. Valores de resistividad eléctrica (ρ) de los tres concretos evaluados a diferentes edades.

Con base en los valores de resistividad eléctrica y criterios de la norma mexicana NMX-C514 [23] indicados en la figura 3.2 con líneas horizontales punteadas, se observó que el concreto MA durante los primeros 50 días de medición se ubicó en nivel de porosidad interconectada excesiva y posteriormente se mantuvo en nivel de porosidad interconectada de consideración. Para el caso del concreto MB, las primeras mediciones (40 días) se ubicaron en nivel de porosidad interconectada de consideración; pero con el paso del tiempo se ubicó en nivel de porosidad interconectada baja y extremadamente baja. Finalmente, el concreto MC mostró variación en los niveles de porosidad, los primeros valores oscilaron en nivel de porosidad interconectada baja y extremadamente baja, pero después de 150 días tendió al nivel de porosidad interconectada de consideración, el día 325 retornó al nivel de porosidad interconectada baja.

3.3 Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro.

La figura 3.3 presenta los resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro, obtenidos hasta el día 300. En la misma figura aparecen los niveles de permeabilidad de acuerdo con los criterios de la norma ASTM C1202 [24] con líneas horizontales punteadas.

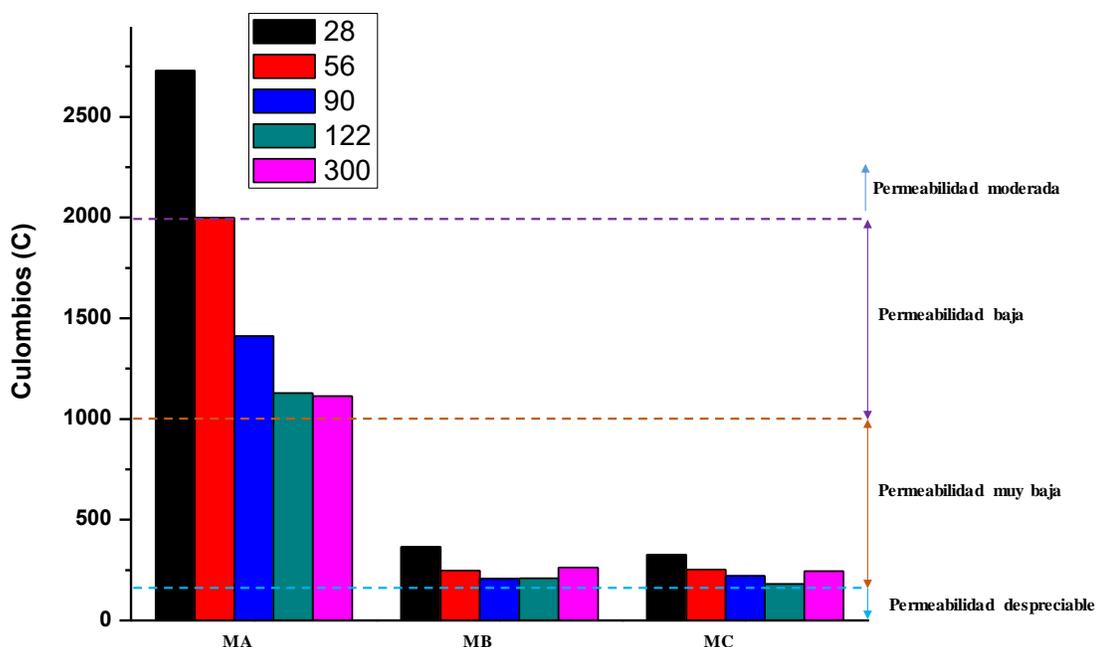


Figura 3.3. Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro de los tres concretos: MA, MB y MC.

A partir de la figura 3.3, se aprecia claramente que el nivel de permeabilidad mayor fue obtenido en las muestras del concreto MA, nivel que osciló en nivel de permeabilidad bajo y moderado; mientras que los concretos MB y MC mostraron nivel de permeabilidad muy bajo; esta diferencia se atribuye al contenido de ceniza volante activada en las mezclas de concreto.

3.4 Resultados de resistencia mecánica a la compresión.

En la figura 3.4, se aprecian las resistencias mecánicas a la compresión obtenidas por un período de 360 días de los concretos MA, MB y MC.

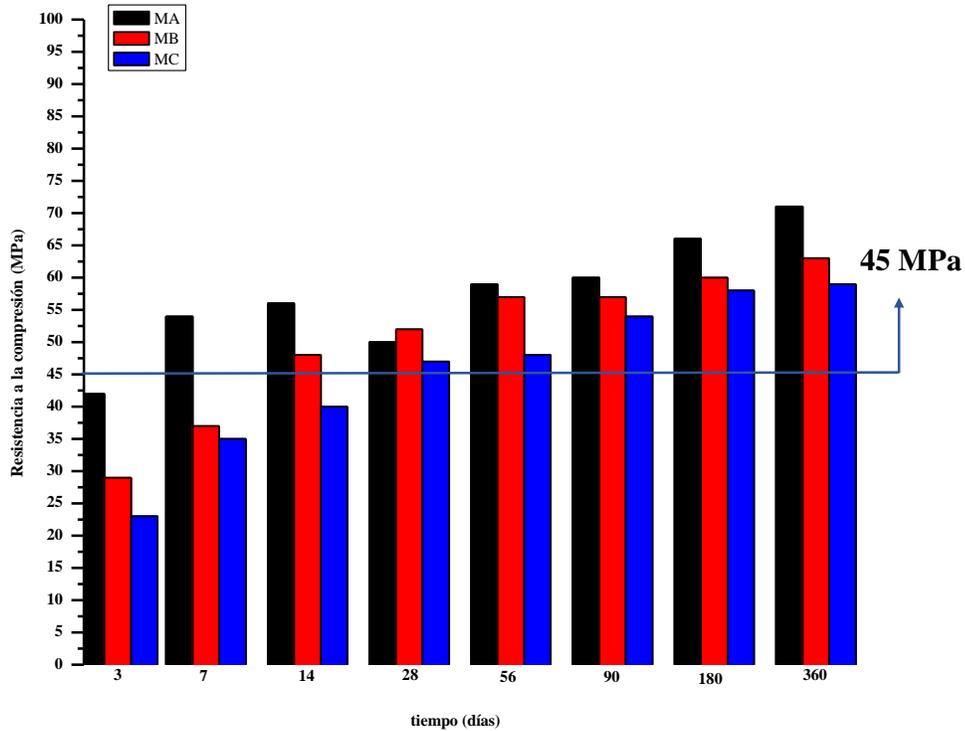


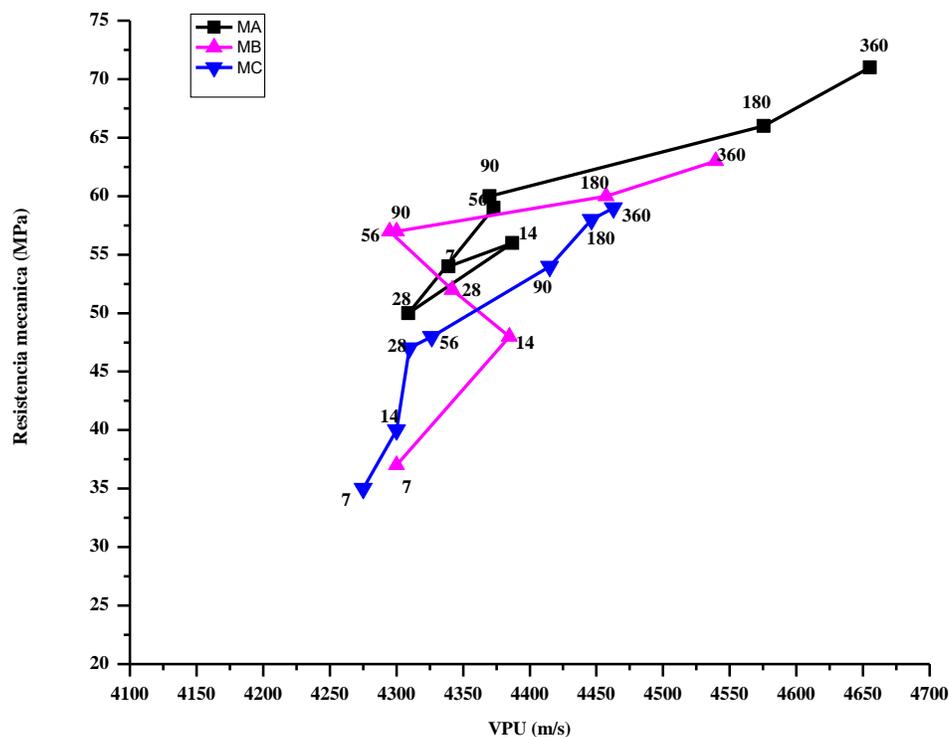
Figura 3.4. Resistencias mecánicas obtenidas por un período de 360 días.

La resistencia máxima alcanzada por el concreto MA fue del orden de los 71 MPa, para MB 63 MPa y MC 59 MPa. De acuerdo con el criterio del Manual de la Red DURAR [21] y la figura 3.4, un concreto durable se considera cuando su resistencia mecánica es >45 MPa; en los tres casos, este valor se consiguió a la edad de 28 días.

3.5 Discusión de resultados

3.5.1 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) vs resistencia mecánica a la compresión

De acuerdo con la figura 3.5, los tres concretos evaluados se ubicaron en valores de velocidad de pulso ultrasónico mayores a 4275 m/s y las resistencias mecánicas superaron los 35 MPa, en todas las edades evaluadas. Se observó también que a edades mayores a 56 días, la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico fueron en aumento de manera paralela respecto al paso del tiempo, alcanzando los valores máximos con el concreto MA, seguido por MB y finalmente MC.



*7,14,28,56,90,180 Y 360 se refiere a la edad de las mezclas

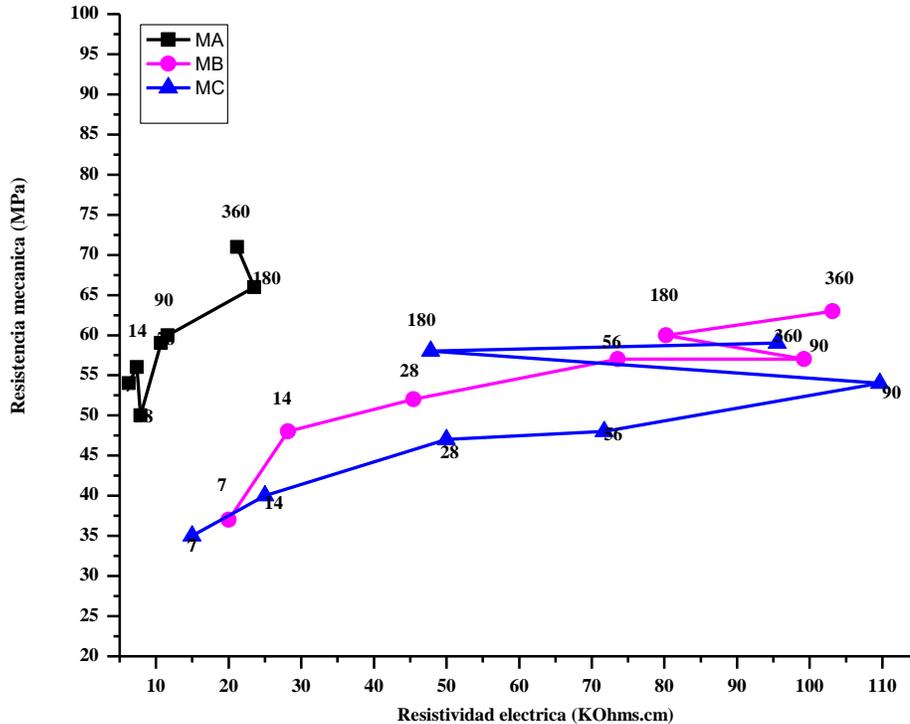
Figura 3.5. Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 7,14,28,56,90,180 y 360 días.

Considerando que una velocidad de pulso ultrasónico >4000 m/s y una resistencia mecánica >45 MPa son parámetros que indican que se trata de un concreto de calidad durable, la mezcla MA cumplió con ambos criterios en todas las edades; mientras que la mezcla MB, después de 14 días; y la mezcla MC, después de 28 días.

3.5.2 Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica a la compresión

Considerando la figura 3.6, la mezcla MA mostró valores de resistividad eléctrica y resistencia mecánica a la compresión de manera ascendente respecto al paso del tiempo; sin embargo, aun cuando hubo incremento en ambos parámetros respecto al tiempo, en el caso de la resistividad eléctrica no fue considerable como se observó en las mezclas con contenidos de ceniza volante activada (MB y MC), casos donde fue evidente que a medida que el tiempo transcurrió, la resistividad

eléctrica incrementó. Para el caso de las resistencias mecánicas a la compresión, con el paso del tiempo incrementaron gradualmente; comportamiento asociado con la lenta reacción puzolánica de la ceniza volante [3,11], alcanzando a 28 días, resistencias del orden de 45 MPa.



*7,14,28,56,90,180 Y 360 se refiere a la edad de las mezclas

Figura 3.6. Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 7,14,28,56,90,180 y 360 días.

Si partimos en que un concreto para ser considerado como durable debe tener una resistencia mecánica a la compresión >45 MPa y una resistividad eléctrica >50 KΩ.cm [21,23], las mezclas con contenidos de ceniza volante activada cumplieron estos dos criterios después de 28 días de edad; mientras la mezcla MA solo cumplió el criterio de resistencia mecánica en todas las edades de evaluación.

3.5.3 Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro

En la figura 3.7, se observó que a mayor valor de resistividad eléctrica el nivel de permeabilidad resultó menor, esto fue más evidente en las mezclas MB y MC respecto a la mezcla MA. Considerando que la resistividad del concreto aumentó con el transcurso del tiempo debido al refinamiento de la estructura del poro [27], se considera que la presencia de la ceniza volante favoreció el refinamiento de la estructura poro originando menor permeabilidad.

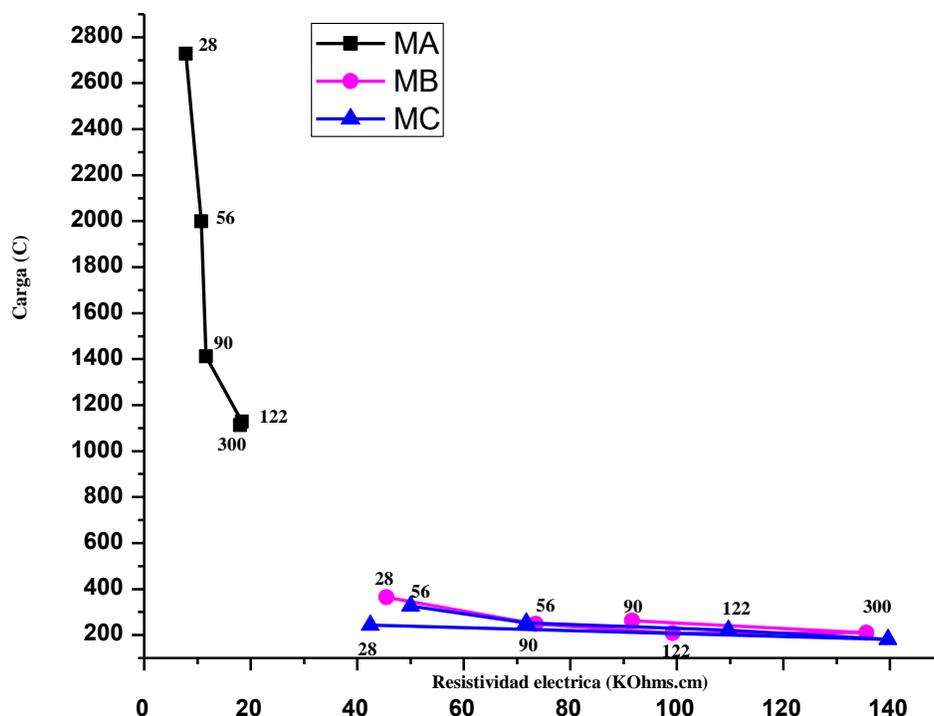


Figura 3.7. Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro de los concretos MA, MB y MC obtenidas a edades de 28,56,90,122 y 300 días.

4 Conclusiones

1. Considerando los resultados de velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas MA, MB y MC; los tres casos demostraron calidad considerada para un concreto durable.
2. Con base en los valores de resistividad eléctrica, las mezclas con contenido de ceniza volante activada (MB y MC) alcanzaron valores de porosidad interconectada baja, mientras la mezcla MA mostró nivel de porosidad interconectada excesiva y de consideración; esto significa que el transporte de agentes agresivos es más factible en la mezcla sin ceniza volante respecto a las mezclas con contenido de ceniza volante activada.
3. De acuerdo con los valores de permeabilidad del ión cloruro, las mezclas con contenidos de ceniza volante activada presentaron un nivel de permeabilidad muy bajo; mientras que la mezcla sin contenido de ceniza volante mostró nivel de permeabilidad bajo y moderado. Esto expresa que el contenido de ceniza volante activada en las mezclas de concreto es favorable para alcanzar materiales poco permeables a este ión beneficiando su durabilidad.
4. Según los valores de resistencia mecánica a la compresión, la mezcla MA a partir de 7 días alcanzó valores >45 MPa; mientras las mezclas MB y MC alcanzaron este valor a la edad de 28 días. Esto indica que es posible fabricar y utilizar concretos que no requieran resistencias a edades más tempranas de 28 días.
5. Conforme con los resultados de las dos mezclas con contenido del 50 y 65% de ceniza volante activada, se concluye que ambos porcentajes de sustitución satisfacen las propiedades consideradas en esta investigación para lograr un concreto durable.

4.1 Recomendaciones

Con base en toda la información recabada, se recomienda como primer paso para valorar la durabilidad de un concreto, realizar al menos los cuatro ensayos descritos en este trabajo: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión.

Con la información generada en esta investigación, se sugiere continuar con el monitoreo de las propiedades aquí descritas, para adquirir información a mayor edad y complementar el trabajo con propiedades tales como resistencia a sulfatos, carbonatación y determinar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en las mezclas descritas.

Bibliografía

- [1] FERRER Mena, Manuel. Acondicionamiento de la primera ceniza volante producida en México para su utilización en el concreto. Ingeniero Civil. REVISTA IMCYC, 1985, vol. 23, no. 172, p. 51-59.
- [2] FERRER Mena, Manuel. Durabilidad de estructuras de concreto en México Previsiones y recomendaciones. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 2005.
- [3] MISHRA, Dhanada Kanta; YU, Jing; LEUNG, Christopher Kin Ying. Very high volume fly ash green concrete for application in Indian. Global Waste Management, International Society of Waste Management, Air and Water, 2017, p. 480-487.
- [4] MALHOTRA, V. M. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash. Cement & Concrete Composites, 1990, vol. 12, p. 271-277.
- [5] ÁLVAREZ, Alonso M., RÍO, Suárez O. The use of fly ash in concrete blocks. Materiales de Construcción, 1991, vol. 41, no. 224, p. 43-54.
- [6] MOLINA, Bas O. I., MORAGUES, Terrades A., GÁLVEZ Ruiz J. C. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento pórtland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ión cloruro y el dióxido de carbono. Encuentro del Grupo Español de Fractura, 2008.
- [7] GARCÉS, P.; ZORNOZA, E.; BAEZA, F.; GALAO, O.; PAYÁ J. ¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?. Revista Alconpat, 2012, Vol. 2, no. 2, p. 57-71.
- [8] UYSAL, M.; AKYUNCU, V. Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. Construction and Building Materials, 2012, vol. 34, p. 170-178.
- [9] SANYTSKY, Myroslav; RUSYN, Bohdan; HALBINIAK, Jacek; SZYMAŃSKA Joanna. Influence of ultrafine ground fly ash on the microstructure and properties of cementitious materials. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, 2013, vol. 2, no. 12, p. 96-102

- [10] MADHAVI, T. Ch.; SWAMY Raju L., DEEPAK Mathur. Durability and strength properties of high volume fly ash concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 2014, vol. 4, no. 2, p. 7-11.
- [11] SAHA, A. K. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 2018, vol. 28, no. 1, p. 25–31.
- [12] VARGAS, J.; HALOG, A. Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 103, p. 948-959.
- [13] ASTM C618. Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. 2017.
- [14] BS EN 450-1. Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria. 2012.
- [15] MUCSI, G. Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2016, vol. 68, no. 2, p. 56-61.
- [16] SAHOO, S. A Review of activation methods in fly ash and the comparison in context of concrete strength. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2016, vol.3, no. 10, p. 883-887.
- [17] PALOMO, A.; GRUTZECK, M.; BLANCO M. Alkali-activated fly ashes A cement for the future *Cement and Concrete Research*, 1999, vol. 29, pp. 1323-1329.
- [18] HELA R., ORSÁKOVÁ, D. The mechanical activation of fly ash. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 65, p. 87-93.
- [19] NMX-C-159-ONNCCE. Concreto, elaboración y curado de especímenes en el laboratorio. 2016.
- [20] NMX-C-148-ONNCCE. Industria de la construcción-cementos hidráulicos gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos. 2010.
- [21] Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), subprograma XV "Corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática Durabilidad de la armadura. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". DURAR (1998). 2a Edición
- [22] ASTM C 597 Standard test method for pulse velocity through concrete. 2016.

[23] NMX C514. Industria de la construcción resistividad eléctrica del concreto hidráulico, especificaciones y métodos de ensayo. 2016.

[24] ASTM C 1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. 2012.

[25] ASTM C 39. Standard Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. 2018.

[26] NMX C083. Industria de la construcción concreto determinación de la resistencia a la compresión de especímenes método de ensayo. 2014.

[27] NATH, P., SARKER P. Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. Procedia Engineering, 2011, vol. 14, p. 1149-1156.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015