



CONCRETOS HÍBRIDOS DURABLES Y SUSTENTABLES CON CONTENIDOS DE CENIZA VOLANTE ACTIVADA Y CEMENTO PORTLAND TIPO CPC 40 RS

Mariela Rendón Belmonte
Rosa Verónica Martínez Pérez
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 583
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Concretos híbridos durables y sustentables con
contenidos de ceniza volante activada y cemento
portland tipo CPC 40 RS**

Publicación Técnica No. 583
Sanfandila, Qro, 2020

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

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 19/19: *Concretos híbridos durables y sustentables con contenidos de ceniza volante activada y cemento CPC 40 RS.*

Se agradece la colaboración del grupo de la empresa Colossal Cement Mixer de México SC., especialmente del Arq. Alexander Ramos Luria y el Tec. Luis Antonio Falcón Nava.

Contenido

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Sinopsis	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo	xiii
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	3
Capítulo 2. Metodología experimental	9
Capítulo 3. Resultados	15
Capítulo 4. Conclusiones	21
Bibliografía	23

Índice de figuras

Figura 2.1	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	10
Figura 2.2	Prueba de resistividad eléctrica: a) verificación del equipo; b) conexión de cables a equipo y placas de cobre, y c) medición de resistencia eléctrica	11
Figura 2.3	Muestra de concreto colocada al vacío	12
Figura 2.4	Conexión de celdas a equipo de permeabilidad	12
Figura 2.5	Software PROOVE it para ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro	13
Figura 2.6	Máquina servo hidráulica utilizada para ensayos de resistencia a la compresión	13
Figura 3.1	Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de las tres mezclas de concreto evaluadas a diferentes edades	15
Figura 3.2	Resultados de resistividad eléctrica (ρ) de las tres mezclas de concreto evaluadas a diferentes edades	16
Figura 3.3	Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro de los tres concretos: M1', M2' y M3'	17
Figura 3.4	Resistencias mecánicas obtenidas por un período de 500 días	18
Figura 3.5	Resistividad eléctrica vs. permeabilidad rápida al ión cloruro de los concretos M1', M2' y M3' obtenidas a edades de 28, 56, 90, 180, 300 y 500 días	19
Figura 3.6	Velocidad de pulso ultrasónico vs. resistencia mecánica de los concretos M1', M2' y M3', obtenidas a edades de 28, 56, 90 y 500 días	20

Índice de tablas

Tabla 1.1	Producción de ceniza volante en central termoeléctrica (CT) de la Comisión Federal de Electricidad (información proporcionada por la CFE)	9
-----------	---	---

Sinopsis

Esta investigación presenta resultados de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad eléctrica (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a diferentes edades de mezclas de concreto de portland CPC 40 RS 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, al presentar baja permeabilidad al ión cloruro y resistencias mecánicas a la compresión. Tales propiedades de los concretos permiten considerarlos como un desarrollo sostenible y durable para la industria de la construcción, ya que contribuyen a disminuir el uso de cementos portland y, por consiguiente, se reducen las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Abstract

This research presents the results of ultrasonic pulse velocity (VPU), electrical resistivity (ρ), rapid permeability to chloride ion and mechanical strength tests at different ages of portland concrete mixtures type CPC 40 RS and with different contents of activated fly ash. The results indicate that activated ash content in the mixtures positively affects the development of electrical resistivity, while showing low permeability to the chloride ion and mechanical resistance to compression. Such concrete properties allow them to be considered as a sustainable and durable development for the construction industry, contributing to the decrease in the use of portland cements, thus reducing carbon dioxide emissions to the atmosphere.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se evaluó el comportamiento de mezclas de concreto fabricadas con distintos contenidos de ceniza volante activada y cemento portland CPC 40 RS, con el objetivo de valorar propiedades tales como: calidad del concreto, resistividad eléctrica (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 se compone de cuatro capítulos, además de la introducción, que se describen brevemente a continuación:

Capítulo 1: Presenta una revisión bibliográfica de trabajos reportados sobre el 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 los mismos, haciendo un comparativo, en función de la mezcla de concreto obtenida con 100% de cemento portland tipo CPC 40 RS.

Capítulo 4: Contiene las conclusiones logradas en el estudio.

Introducción

A nivel mundial, se trabaja continuamente en la concientización del buen uso de los recursos naturales —es decir, evitar su sobre explotación—, contribuir con el cuidado del medio ambiente para minimizar los niveles de contaminación y generación de basura e impulsar el uso de recursos disponibles que proporcionen sustentabilidad. Dentro de las emisiones atmosféricas mundiales, se aprecia que el mayor porcentaje corresponde al dióxido de carbono (CO₂). En 2012, México se ubicó dentro de los países que generaron mayor CO₂, contribuyendo a esta causa el sector industrial y, dentro de este, la industria del cemento. En este caso particular, la producción de cemento va acompañada de la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), debido principalmente a la descomposición de las calizas empleadas en la manufactura de este material (emisiones de proceso) y también, aunque en menor medida, el consumo de los combustibles necesarios para llevar a cabo dicho proceso. La producción de clínker, componente principal del cemento, acarrea la emisión a la atmósfera de aproximadamente 0.9 toneladas de CO₂, lo que sitúa a la industria del cemento como uno de los principales agentes emisores de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo con la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) en México, en 2016 la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas, equivalente a ~ 40.6 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) liberadas al medio ambiente y un consumo nacional de cemento de 40.1 millones de toneladas.

Aunado a esto, cabe destacar la importancia de la durabilidad de las estructuras de concreto, dado que desafortunadamente estructuras construidas con cemento portland expuestas en ambientes corrosivos comienzan a deteriorarse después de 20 a 30 años, a pesar de estar diseñadas para alcanzar una vida útil de más de 50 años (Chandra *et al.*, 2015). Un ejemplo de esto es el estado que presentan los puertos federales en México (Rendón Belmonte *et al.*, 2013).

Dentro de las consideraciones que buscan mitigar esta realidad, se encuentra el desarrollo de concretos ecológicos, definidos como concretos respetuosos del medio ambiente, que proporcionen sustentabilidad y durabilidad para lograr una vida útil larga de las estructuras (Madhavi *et al.*, 2014; Mishra, 2017). En apoyo de este objetivo, se han llevado a cabo investigaciones sobre el reemplazo parcial de la cantidad de cemento portland (CP) en concreto por materiales tales como puzolanas naturales, humo de sílice, escorias, cenizas volantes (Al-Amoudi *et al.*, 1996; Malhotra, 1990; Mehta, 2002; Garcés *et al.*, 2012; Moffatt *et al.*, 2017; Mishra, 2017; Saha, 2018).

Esta investigación se centra en el uso de la ceniza volante, subproducto industrial de centrales termoeléctricas alimentadas por carbón, como material sustituto de

cemento portland CPC 40 RS en mezclas de concreto, dado que, en México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) produce mayor cantidad de ceniza volante que la que se utiliza.

I.1 Objetivo

1. Investigar la viabilidad de la ceniza volante activada como alternativa sustentable, durable y económicamente competitiva, como material sustituto de cemento portland CPC 40 RS en mezclas de concreto.

1 Antecedentes

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) produce mayor cantidad de ceniza volante que la que se utiliza. En la Tabla 1.1 se presentan datos de una central termoeléctrica, obtenidos en 2018.

Tabla 1.1 Producción de ceniza volante en central termoeléctrica (CT) de la CFE (información proporcionada por la misma instancia)

Concepto	Unidad de medida	CT III
Capacidad instalada	MW	1 200
Generación bruta 2018	MWh	6 229 033
Generación neta 2018	MWh	5 690 223
Consumo de carbón	kg	3 759 312 580
Ceniza volante producida	kg	1 278 166 000
Ceniza volante vendida	kg	141 217 000
Ingresos por venta de ceniza volante	pesos	3 952 079
Costo total de manejo y almacenamiento de ceniza	pesos	155 893 373

El desarrollo de la presente investigación se sustenta en las investigaciones reportadas y mencionadas a continuación sobre el efecto de la ceniza volante en concretos:

- Malhotra, (1990) evaluó los aspectos de durabilidad en concretos con sustitución parcial de ceniza volante de un 54% a 58% del total de la masa cementicia. Se empleó cemento portland tipo I, junto con dos especímenes de ceniza, a los que se designó L y S. Las probetas se expusieron a ciclos repetidos de congelado y deshielo. Los valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) resultaron de 4800 m/s para concretos con ceniza S y 4735 m/s para concretos con ceniza tipo L. La

prueba de resistencia a la compresión reporta valores de 39.7 MPa para la ceniza tipo L y 41.2 MPa para la ceniza tipo S a 28 días. En la prueba de permeabilidad al ión cloruro, a 91 días se obtuvo baja permeabilidad con resultados del intervalo de 197 a 973 Culombios. Este autor menciona que las reacciones álcali-agregado en el concreto pueden controlarse usando ceniza volante en un rango de 30 a 40%, además de disminuir el calor de hidratación y el contenido de cemento en las mezclas de concreto.

- Montemor M. F. (2000) reporta que el uso de cenizas volantes en la sustitución parcial de cemento conduce a una mayor resistividad del concreto. Este efecto se cuantificó por inmersión completa y parcial. Frente a condiciones más agresivas —es decir, en el caso de inmersión parcial en solución de cloruro de sodio—, un reemplazo del 30% del cemento por cenizas volantes ocasionó un aumento significativo del tiempo de inducción y una reducción de la velocidad de corrosión en un orden de magnitud.
- Santaella (2001) reportó que las cenizas volantes contribuyen a la reducción de la masa por metro cúbico de concreto fresco, lo que las vuelve más livianas en comparación con el concreto patrón.
- Santaella y Salamanca (2004) mencionan que el concreto adquiere resistencias altas con pequeñas adiciones de ceniza en reemplazo de cemento a partir de 28 días y, al sustituir arena triturada por ceniza, se obtienen mayores resistencias a medida que se incrementa la cantidad de ceniza y aumenta la edad, debido a que la cantidad de cemento permanece constante.
- Durán y Rivera (2004) y Canul J. A. *et al.* (2015) observaron que el incremento de sustitución del cemento portland por ceniza volante genera un aumento en el valor de la resistencia a la compresión, con contenidos de cemento portland (100-150 kg/m³), siendo imprescindible el uso de un superfluidificante para ambas cantidades.
- Molina *et al.* (2008) estudiaron la influencia de la ceniza volante en el aspecto de durabilidad, empleando porcentajes del 0, 15 y 35% como sustituto parcial de cemento portland y dos cementos, con diferentes relaciones de C₃S/C₂S, el primero de clase resistente por finura de molido denominado F y el segundo por su composición designado G. Los resultados mostraron que el uso de la ceniza volante retarda la difusión de dióxido de carbono (CO₂) en el concreto a los 28 y 56 días debido al contenido libre de portlandita Ca(OH)₂. En la prueba de penetración del ión cloruro, se observó que, al aumentar el volumen de la ceniza volante, disminuye la penetración de este ión debido a la reducción de porosidad producida por la adición de ceniza volante. En

cuanto a la resistencia a la compresión, los autores indicaron que el aumento de cenizas del 15% al 35% no modifica significativamente el comportamiento mecánico del material. Los cambios que produce la adición de ceniza volante en el proceso de carbonatación varían por el tipo de cemento empleado, y el mejor comportamiento lo presentan en ambos casos los concretos con una sustitución de un 15% de ceniza.

- Medina *et al.* (2010) caracterizaron una ceniza volante mexicana de la termoeléctrica “José López Portillo” y encontraron que dicho material tiene altos contenidos de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, bajos porcentajes de K_2O (1.3%), Na_2O (0.4%), TiO_2 (0.9%), y P_2O_5 (0.04%), comparados con una ceniza volante europea, por lo que concluyen que podría ser útil en la producción de concreto. Reportan también que tiene propiedades similares a las cenizas volantes reportadas como materias primas utilizadas para sintetizar zeolitas o geopolímeros.
- Caballero Olague *et al.* (2011) mencionan que el uso de la ceniza volante en porcentaje del 25% inhibe la evolución de la reacción álcali sílice (RAS). Esta reacción (RAS) afecta la durabilidad de estructuras de concreto, al generar grietas debido a la expansión de un gel hidrofílico, lo cual se atribuye a la reacción entre la sílice reactiva de los agregados (S^{+2}), el álcali en el clínker del cemento (K^+ , Na^+) y agua en la solución de poro del concreto.
- Uysal y Akyuncu (2012) 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%, y evaluaron la resistencia mecánica, la permeabilidad al ión cloruro y la sortividad. Los resultados mostraron valores altos para resistencia a la compresión 75.06 MPa con ceniza tipo F y 73.84 MPa con ceniza tipo C a 90 días, ambos con un 20% de ceniza volante como sustituto parcial de cemento portland. Para la prueba de permeabilidad al ión cloruro, el valor más bajo de penetración con 131 Coulombios se observó en concretos con un 34% de ceniza volante tipo F, y con 150 Coulombios en concretos con un 25.5% de ceniza tipo C. La sortividad de los concretos decreció con el incremento de la ceniza volante, lo cual se observó en concretos con un 34% de ceniza tipo F a los 90 días, en asociación a la reacción puzolánica.
- Madhavi *et al.* (2014) 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 al ión cloruro de estos concretos es muy baja (a 91 días mostraron un valor menor a 500 Coulombios respecto a un concreto convencional que resultó de 2000 Coulombios). Además, reportan que el calor de hidratación disminuye cuando el reemplazo de cemento por ceniza volante es del 50%, para reemplazos menores que

el 40%, donde la resistencia a la compresión se incrementa a los 28 días y presenta un contenido mayor que el 40%, y el aumento de la resistencia es gradual.

- Gálvez López *et al.* (2015) sugieren que un menor tamaño de partícula favorece el porcentaje de porosidad en morteros (<45 μm), lo que genera mayor área superficial y se ve reflejado en las reacciones producidas, lo cual genera un menor porcentaje de porosidad y material anhidro. Asimismo, destacan que el tamaño de poro oscila en los rangos de mesoporos.
- Canul J. A. *et al.* (2015) estudiaron ceniza volante proveniente de la termoeléctrica Nava, Coahuila, utilizada —sin ningún tipo de modificación— en mezclas de concreto. Concluyen que no se presentó actividad puzolánica, ni se incrementó la resistencia mecánica, por lo que la inclusión podría usarse como un agregado fino inerte.
- Mendoza Rangel *et al.* (2016) evaluaron morteros con un 20% de ceniza volante, como sustituto, y observaron un comportamiento positivo frente al ataque de CO_2 y con 10% menos de probabilidad de corrosión a 145 días, además de registrar valores de permeabilidad “baja”.
- Huaquisto y Belizario (2018) mencionan que al sustituir el cemento por la ceniza volante mejoran la trabajabilidad y la durabilidad y se reduce el costo en su elaboración. Finalmente, adicionar ceniza volante al concreto implica una reducción de la porosidad (dada la finura de esta), sin que ello suponga un aumento de la resistencia.
- Saha (2018) 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. Las mezclas de concreto se diseñaron de acuerdo con la ACI (211). Los concretos sin ceniza volante, a los 7 días de curado, alcanzaron 45.5 MPa de resistencia a la compresión; sin embargo, después de los 28 días de curado se incrementó a 57.4 MPa y a los 360 días alcanzó una resistencia de 62.5 MPa. Con el incremento de adición de ceniza volante, la falta de contenido de óxido de calcio (CaO) en las mezclas de concreto conllevó a disminuir las resistencias a la compresión a los 7 días de curado, con lo que se registraron 39.2 MPa (10%), 33.8 MPa (20%), 29.8 MPa (30%) y 24.6 MPa (40%) respectivamente. A los 28 días de curado, el volumen de poros permeables se encontró en un intervalo de 7.8-9.2% para todas las mezclas; después de seis meses de curado, el intervalo de poros permeables fue de 6.6 (0%), 6.5 (10%), 5.8 (20%), 5.2 (30%) y 5.1 MPa (40%), respectivamente. La

permeabilidad se redujo conforme aumentó la cantidad de ceniza volante.

- Suárez estudió la influencia de la adición de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento de dos maneras: 1) en su estado de recepción original en porcentajes de 0, 15, 20, 25% y 2) tamizada de 75 μm en porcentajes de 0, 20 y 33%. Los resultados del ensayo de absorción indicaron que cuando el porcentaje de sustitución es $>10\%$, la absorción es menor respecto a la muestra sin ceniza volante (0%), que —de acuerdo con el autor— puede deberse a que la ceniza proporciona una mayor compacidad al concreto. Además, menciona que pequeños porcentajes de sustitución de ceniza volante disminuyen el contenido de humedad respecto a la muestra sin ceniza volante (0%). Para el ensayo de resistencia a la compresión, reporta que a edades tempranas se retarda su desarrollo, pero a partir de los 28 días se presenta una evolución similar a la muestra sin ceniza volante (0%). Establece que con un 20% de ceniza se alcanza un aumento de resistencia, pero, cuando el porcentaje de ceniza es mayor de 25%, esta disminuye. Los mejores resultados se obtuvieron con un 20% de sustitución de ceniza volante (en ambos casos).

No obstante, a pesar de que el uso de la ceniza volante como aditivo del concreto es añejo y existe amplia investigación basada en su uso como material de reemplazo de cemento en el concreto, el nivel de reemplazo —de acuerdo con literatura consultada— ha sido limitado y se fundamenta básicamente en la resistencia mecánica a la compresión, lo que ocasiona que exista una cantidad significativa de este material (alrededor del 50%) depositada en vertederos o almacenada, con el grave riesgo ambiental que conlleva, junto con la disminución de la reactividad de la ceniza volante debido a las condiciones de intemperismo (Mishra, 2017). Con todo, el uso de la ceniza volante es considerado como una solución efectiva (Zobal *et al.*, 2017).

Con la finalidad de mejorar las propiedades del concreto e incrementar los porcentajes de sustitución de ceniza volante, se han explorado diferentes metodologías, tales como: reducción de la relación agua-material cementicio; sustitución de cemento de Pórtland de alta resistencia inicial por cemento de Pórtland ordinario; reemplazo de una porción de la ceniza volante por una puzolana más reactiva como humo de sílice o ceniza de cáscara de arroz; incorporación de nanomateriales; curado acelerado (Yu *et al.*, 2017), incluso el uso de métodos químicos, mecánicos, térmicos, o la combinación de estos con el objetivo de mejorar la reactividad de este deshecho (Mucsi, 2016; Sahoo, 2016). La activación alcalina consiste en un proceso químico que permite la transformación de un material con una estructura parcial o totalmente amorfa en compuestos cementantes compactos (Palomo *et al.*, 1999). La activación mecánica se define como la activación por medio de un proceso de molienda o tamizado y separación de aire, y la activación térmica

se refiere al lento o rápido enfriamiento con la consiguiente generación de cambios en la relación vítreo-cristalino (Hela *et al.*, 2013; Mucsi, 2016). Además de estos métodos, existe la electrometagénesis, que consiste en la activación de la ceniza volante a partir del ingreso de iones de una solución alcalina mediante la aplicación de un campo eléctrico a través del concreto endurecido (Lizarazo *et al.*, 2015).

Considerando los antecedentes del uso de la ceniza volante, su bajo costo y la disponibilidad actual (almacenada) de dicho material en México, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) realizó mediciones de propiedades referentes a la durabilidad en mezclas de concretos fabricados con diferentes contenidos de ceniza volante activada (0, 30 y 50% de sustitución por cemento portland) por un período de casi 500 días.

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 CPC 40 RS; hidratadas con agua potable y curadas como un concreto tradicional. Se fabricaron dos mezclas con contenidos de sustitución de ceniza volante activada del 30 y 50% por cemento portland CPC 40 RS (MB´ y MC´, respectivamente) y, como referencia se fabricaron muestras de cemento de portland tipo CPC 40 RS 100% (MA´). El monitoreo consistió en obtener la calidad del concreto (VPU), así como su resistividad eléctrica (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión a diferentes edades durante un período de casi 500 días.

2.1 Fabricación de muestras de concreto

Las mezclas de concreto se fabricaron de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NMX-C-159 [19], hidratadas con agua potable del suministro municipal y curadas conforme a la norma NMX-C-148 [20]. 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. De cada mezcla se obtuvieron 57 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Posterior al período de curado (28 días), todas las muestras se colocaron en condición sumergida en agua potable en un contenedor cubierto con plástico y con su respectiva tapa, y se conservaron a temperatura ambiente.

2.2 Ensayos de prueba

Los ensayos realizados fueron velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad eléctrica (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión a diferentes edades y por un período de casi 500 días.

2.2.1 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 generarse 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, y 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 ; posteriormente, este valor se convierte a m/s considerando la distancia en (m) y el tiempo de tránsito en (s), con base en 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 2.1 muestra el procedimiento que se siguió para realizar este ensayo.



Figura 2.1. Ensayo de VPU: a) equipo VPU con sus respectivas conexiones; b) posición de los transductores en la muestra y c) determinación de la velocidad de pulso.

2.2.2 Resistividad eléctrica (ρ)

Este ensayo se realizó 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:

$$\rho = R\left(\frac{A}{a}\right)$$

donde:

R = es la resistencia en ohms (Ω)

A = es el área de sección transversal en cm^2

a = es la longitud de la muestra en cm

El procedimiento seguido se aprecia en la Figura 2.2.

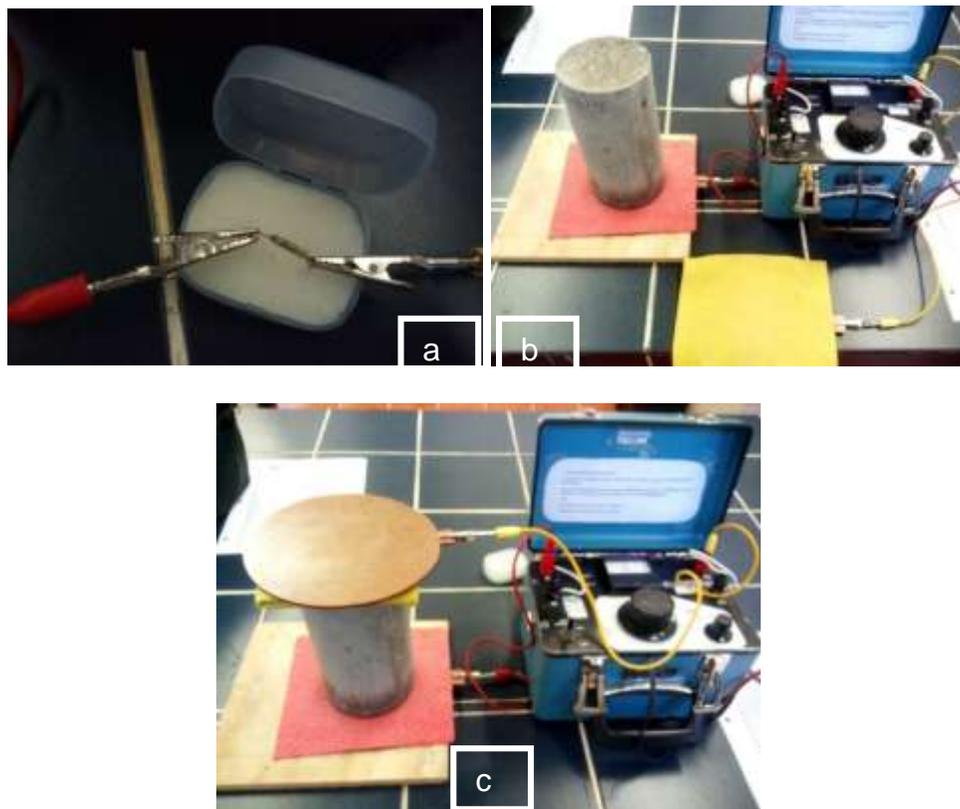


Figura 2.2 Prueba de resistividad eléctrica: a) verificación del equipo; b) conexión de cables a equipo y placas de cobre, y c) medición de resistencia eléctrica.

2.2.3 Permeabilidad rápida al ión cloruro

Para esta prueba fue necesario obtener de cada cilindro a ensayar dos rodajas de 5 cm de espesor por 10 cm de diámetro con el apoyo de una cortadora de concreto. Estas rodajas se colocaron en vacío durante tres horas; posteriormente, se incorporó agua descarbonatada en desecador y se dejó por una hora más en vacío, como muestra la Figura 2.3. 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. A continuación, 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 2.4). El software empleado fue PROVEE it y la duración de la prueba fue de seis horas (Figura 2.5). El dato obtenido con esta prueba fue la carga en Coulombios (C), valor que posteriormente se interpretó de acuerdo con las especificaciones previstas en la norma ASTM C1202.



Figura 2.3 Muestra de concreto colocada al vacío.

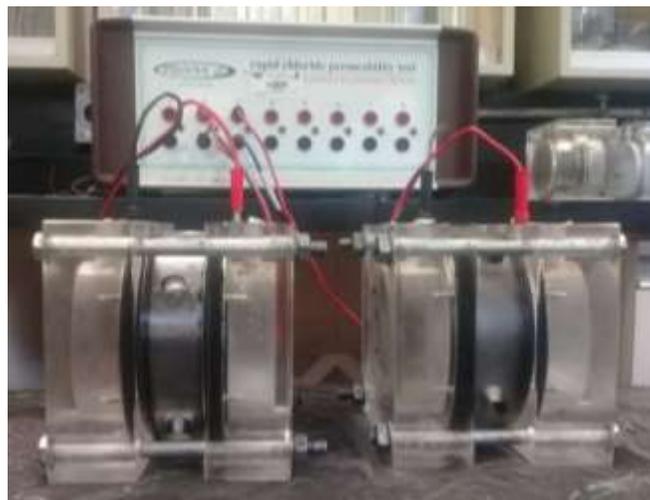


Figura 2.4 Conexión de celdas a equipo de permeabilidad.

	1	2	3	4	5	6	
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	---	---	---	---	---	---	---
System Control	---	---	---	---	---	---	---
	184	219	---	---	---	---	---
	V.Low	V.Low	---	---	---	---	---

Figura 2.5 Software PROOVE it para ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro.

2.2.4 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 servo hidráulica marca INSTRON, como muestra la Figura 2.6.



Figura 2.6 Máquina servo hidráulica 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 20 cilindros de cada mezcla de concreto evaluada.

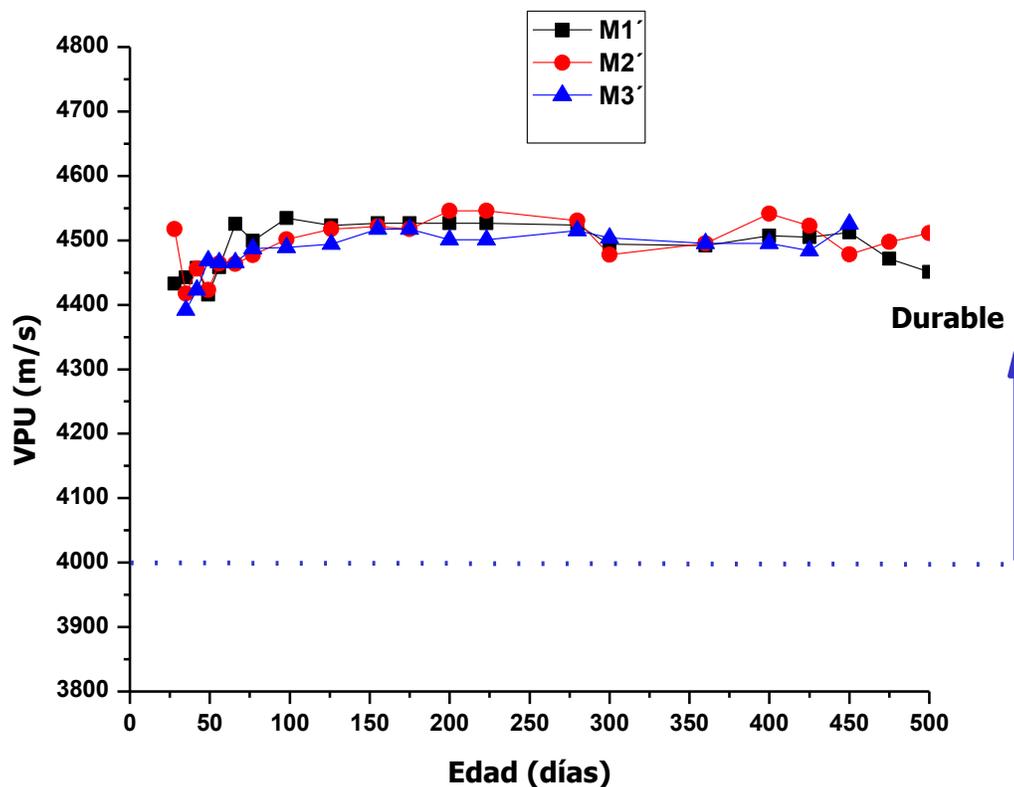


Figura 3.1. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de las tres mezclas de concreto evaluadas a diferentes edades.

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*.

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 a veinte cilindros de cada mezcla de concreto. La condición de medición fue saturada, misma que, de acuerdo con la norma mexicana NMX-C514, se refiere a la resistividad eléctrica real.

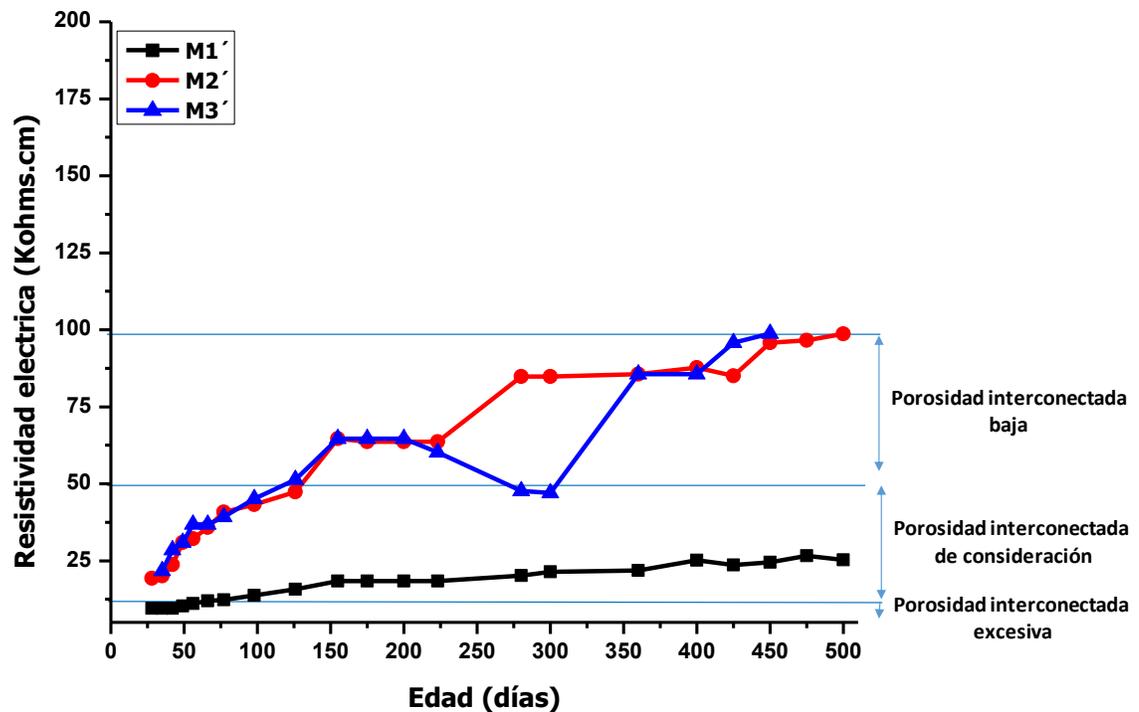


Figura 3.2. Resultados de resistividad eléctrica (ρ) de las tres mezclas de concreto evaluadas a diferentes edades.

Con base en los valores de resistividad eléctrica y los criterios estipulados en la norma mexicana NMX-C514 [23], indicados en la figura 3.2 con líneas horizontales, se observó que, durante los primeros 125 días de medición, las dos mezclas con contenidos del 30 y 50% de ceniza volante activada se ubicaron en nivel de porosidad interconectada de consideración; posteriormente, los valores de las mezclas M2' y M3' se incrementaron, y alcanzaron un nivel de porosidad interconectada baja. Para el caso de la mezcla M1' (100% cemento portland CPC 40 RS), los valores de resistividad resultaron menores, conservándose durante todo el monitoreo en nivel de porosidad interconectada de consideración.

3.3 Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro

La figura 3.3 presenta los resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro, obtenidos al día 500. En la misma figura aparecen los niveles de permeabilidad, con base en los criterios de la norma ASTM C1202, con líneas horizontales.

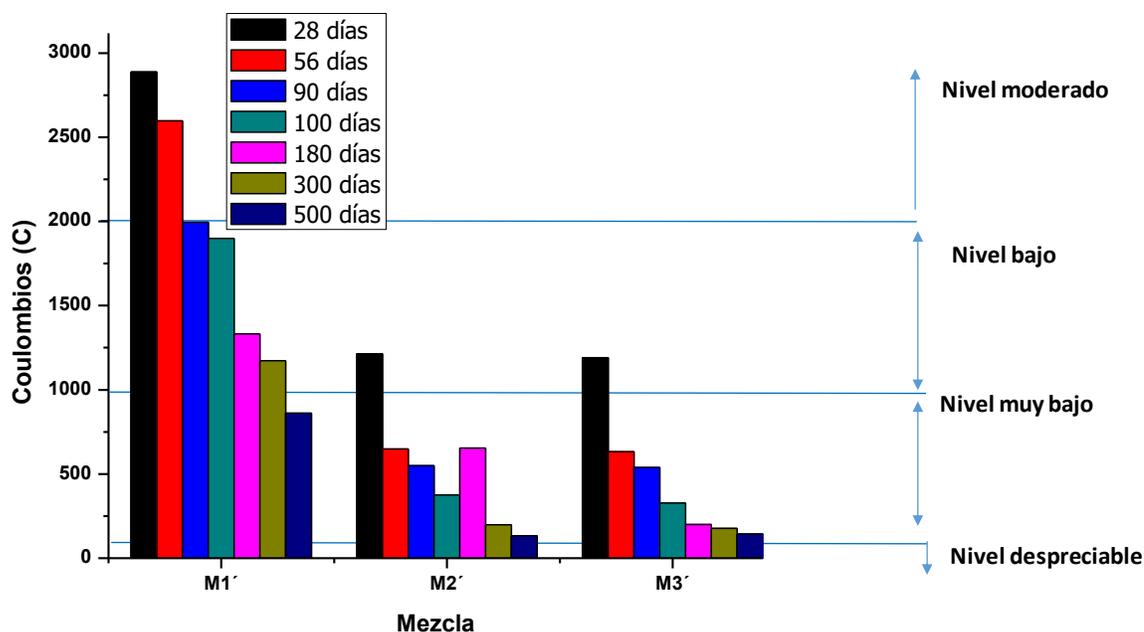


Figura 3.3. Resultados de permeabilidad rápida al ión cloruro de los tres concretos: M1', M2' y M3'.

A partir de la figura 3.3, se aprecia que el nivel de permeabilidad durante las mediciones a la edad de 300 días, M1' obtuvo valores que oscilaron de nivel de permeabilidad moderado a bajo, valores superiores a los obtenidos con M2' y M3', que estuvieron entre nivel bajo y nivel muy bajo. En la medición obtenida a 500 días, el nivel de permeabilidad de la mezcla M1' se ubicó en nivel muy bajo de permeabilidad, valor alcanzado el día 56 por las mezclas M2' y M3'.

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 500 días de los concretos M1', M2' y M3'.

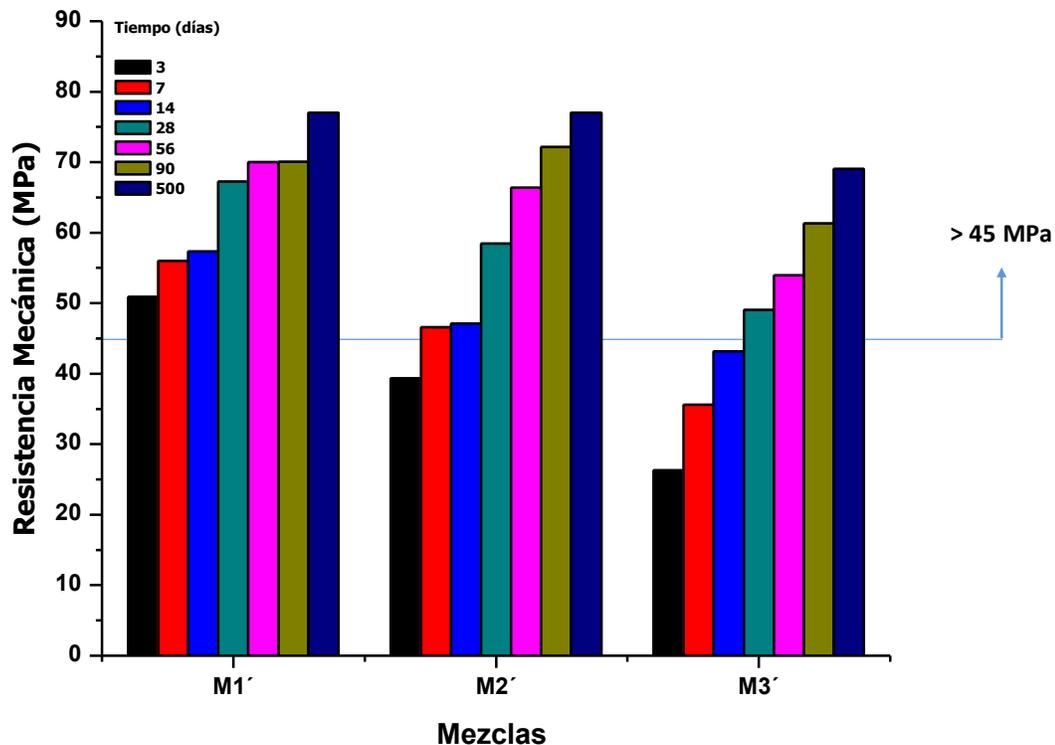


Figura 3.4. Resistencias mecánicas obtenidas por un período de 500 días.

La resistencia máxima alcanzada a 500 días por el concreto M1' fue del orden de los 77 MPa, para M2' 77 MPa y M3' 65 MPa. De acuerdo con el criterio establecido en el *Manual de la Red DURAR* [21] y la figura 3.4, un concreto se considera durable cuando su resistencia mecánica es >45 MPa; este valor para las tres mezclas se consiguió a la edad de 28 días, aunque es cierto que valores de resistencia a la compresión menores se observaron en M3' en todas las edades.

3.5 Análisis de resultados

3.5.1 Resistividad eléctrica vs. permeabilidad rápida al ión cloruro

En la figura 4.1, se observó que a mayor valor de resistividad eléctrica menor el nivel de permeabilidad al ión cloruro, condición 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, se

considera que la presencia de la ceniza volante activada favoreció el refinamiento de la estructura del poro, lo que origina menos permeabilidad.

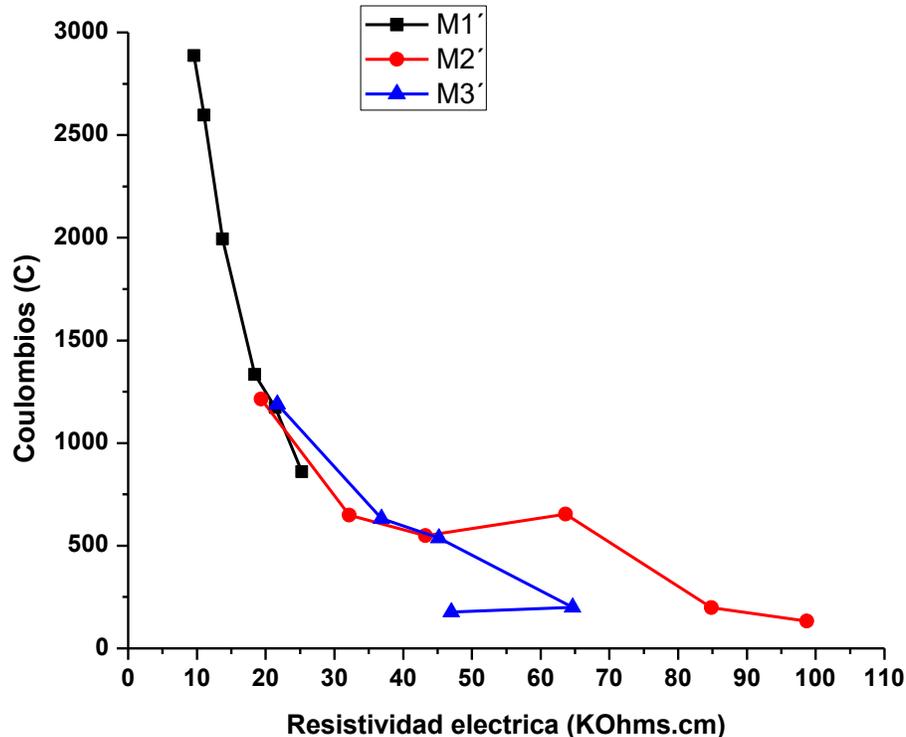


Figura 3.5. Resistividad eléctrica vs. permeabilidad rápida al ión cloruro de los concretos M1', M2' y M3', obtenida a edades de 28, 56, 90, 180, 300 y 500 días.

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

Considerando la figura 4.2 y los criterios de una velocidad de pulso ultrasónico >4000 m/s y una resistencia mecánica >45 MPa, se concluye que se trata de un concreto de calidad durable. En las tres mezclas se observó que ambos valores se cumplieron en las edades reportadas. Las resistencias a la compresión fueron mayores en la mezcla M1', seguida por M2' y finalmente M3'. Se dedujo que la velocidad de pulso ultrasónico no fue proporcional a la resistencia mecánica (M1' y M2').

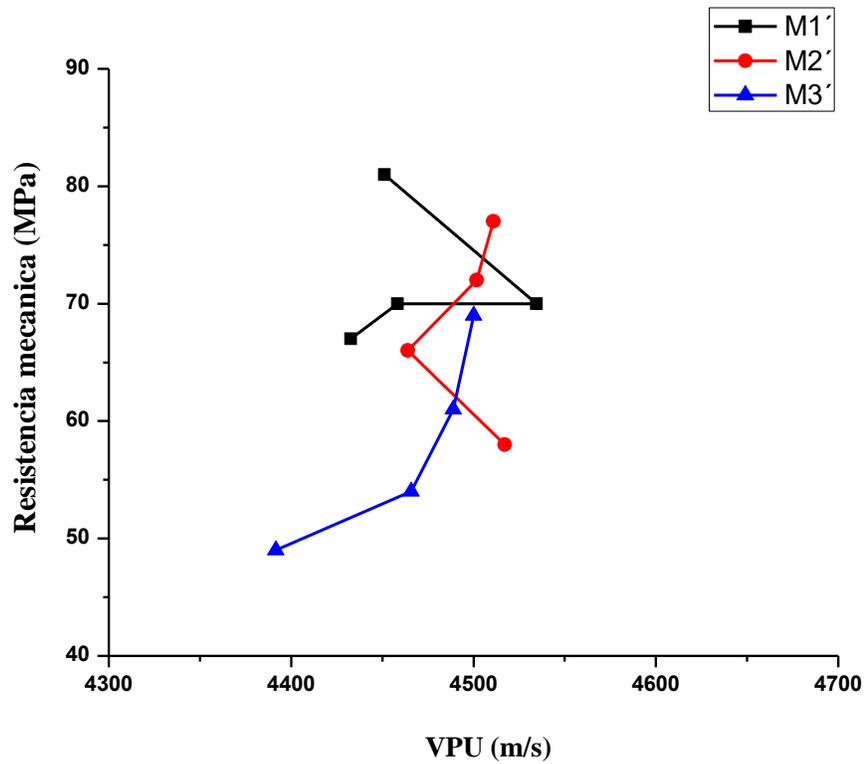


Figura 3.6. Velocidad de pulso ultrasónico vs. resistencia mecánica de los concretos M1', M2' y M3', obtenida a edades de 28, 56, 90 y 500 días.

4 Conclusiones

1. Considerando los resultados de velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas M1', M2' y M3', en los tres casos la calidad del concreto resultó durable.
2. Con base en los valores de resistividad eléctrica, las mezclas con contenido de ceniza volante activada (M2' y M3') alcanzaron valores de porosidad interconectada bajos, mientras que la mezcla M1' mostró un nivel de porosidad 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 posterior a 28 días presentaron un nivel de permeabilidad muy bajo, mientras que la mezcla sin contenido de ceniza volante alcanzó este nivel de permeabilidad a la edad de 500 días. Esto expresa que el contenido de ceniza volante activada en las mezclas de concreto es favorable para alcanzar materiales poco permeables a este ión beneficia su durabilidad.
4. Según los valores de resistencia mecánica a la compresión, la mezcla M1' a partir de tres días alcanzó valores >45 MPa mientras que las mezclas M2' los alcanzaron a los siete días y M3' a la edad de 28 días. Esto indica que es posible fabricar y utilizar concretos que no requieran resistencias altas a edades más tempranas de 28 días.
5. Conforme con los resultados de las dos mezclas con contenido del 30 y 50% de ceniza volante activada, se concluye que ambos porcentajes de sustitución satisfacen las propiedades consideradas en esta investigación para lograr un concreto durable.

Bibliografía

“ASTM C1202 (2019) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.” Disponible en: <https://doi.org/10.1520/C1202-12>.

Chandra Debanath, O., Saiful Islam, Md., Moinul Islam, Md. (2015), “Use of Geopolymer Concrete as Green Construction Material- A Review”, Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE 2015), 26-29 de noviembre de 2015, Chittagong, Bangladesh.

Durán Herrera A. y J. M. Rivera Torres, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., 2004, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Garcés, P., E. Zornoza, F. Baeza, O. Galao y J. Payá (2012), “¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?”, *Revista ALCONPAT*, vol. 2, no. 2, pp. 57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2.i2.27>.

Huaquisto Cáceres, S. y G. Belizario Quispe (2018), “Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento”, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 20, no. 2, pp. 225-234. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.366>.

Lizarazo Marriaga, J., F. García y C. Higuera Flórez (2015), “Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química”, *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 35, no. 2, pp. 305-314. eISSN: 2244-7113.

Madhavi, T. Ch., L. Swamy Raju y D. Mathur (2014), “Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete”, *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 4, pp. 7-11. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201401.02.html>.

Malhotra, V. M. (1990), “Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 12, no. 4, pp. 271-277, DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90006-J).

Mehta, K. (2002), “Greening of the concrete industry for sustainable development”, *Concrete international*, vol. 24, no. 7, pp. 23-28.

Mendoza Rangel J.M, J. M. Flores Jarquín, E. U. de los Santos y P. Garcés (2016), “Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial”, *ALCONPAT*, vol. 6, no. 1, pp. 41-51.

Mishra, D. K., J. Yu y C. K. Y. Leung (2017), "Very high volume fly ash green concrete for applications in India", *Global Waste Management*, International Society of Waste Management, Air and Water. pp. 480-487.

Moffat, E., M. Thomas y A. Fahim (2017), "Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment", *Cement and Concrete Research*, . 102, pp. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>.

Molina, Bas O. I., A. Moragues Terrades y J. C. Gálvez Ruiz (2008), "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento de pórtland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ión cloruro y el dióxido de carbono", Encuentro del Grupo Español de Fractura.

Montemor M. F., A. M. P. Simões, M. G. S. Ferreira y M. M. Salta (2000), "Effect of Fly Ash on Concrete Reinforcement Corrosion Studied by EIS", *Cem Conc Comp*, vol. 22, pp. 175.2.

Mucsi, G. (2016), "Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review", *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, vol. 68, no. 2, pp. 56-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>.

NMX-C-083-ONNCCE (2016), "Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo".

NMX-C-109-ONNCCE (2010), "Industria de la construcción - Concreto - Cabeceo de especímenes cilíndricos".

NMX-C-148-ONNCCE (2010), "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".

NMX-C-275-ONNCCE (2004), "Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto - Método de Ultrasonido".

DURAR (1998), *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (2.^a edición), Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, Red temática "Durabilidad de la armadura".

Rendón Belmonte M., A. A. Torres Acosta, A. del Valle Moreno A., J. T. Pérez Quiroz, G. Lomelí González y M. Martínez Madrid (2013), "Evaluación de estructuras de concreto reforzado en México, muelles", capítulo 3, en: *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*, Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.65>.

Saha, K. A. (2018), "Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete", *Sustainable Environment Research*, vol. 28, no. 1, enero, pp. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>.

Santaella Valencia, L. (2001), "Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, no. 10, pp. 47-62.

Santaella Valencia, L. y R. Salamanca Correa (2004), "Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (termopaipa IV9 y agua constante", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, no. 14, pp. 1-7.

Uysal, M. y V. Akyuncu (2012), "Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes", *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 170-178.

Zobal, O., P. Reiterman, T. Plachý y Z. Bittnar (2017), "Durability of Concrete with Fly Ash from the Dam Orlik after 55 Years", *Advanced Materials Research*, vol. 1144, pp. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1144.81>.



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/>