

## Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada

M. Rendón Belmonte<sup>1</sup> , M. Martínez Madrid<sup>1</sup> , R. V. Martínez Pérez<sup>1</sup> , J. T. Pérez Quiroz<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [marielarb17@hotmail.com](mailto:marielarb17@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

Recepción: 20/06/2018 | Aceptación: 28/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Pedro Garcés Terradillos

### RESUMEN

Este artículo describe propiedades referentes a la durabilidad de cinco mezclas de concreto con distintos contenidos de ceniza volante activada (CVA) y cemento portland tipo CPC 40. Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica aparente, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión. Los resultados indicaron que la calidad de todas las mezclas resultó durable, el desarrollo de la resistividad eléctrica y disminución del nivel de permeabilidad al ión cloruro fue favorecido por el contenido de CVA. En cuanto a las resistencias a la compresión, se notó que a mayor contenido de CVA estas resultaron menores. El porcentaje máximo de sustitución de CVA para cumplir con los criterios de durabilidad actuales resultó del 65%.

**Palabras clave:** ceniza volante activada; durabilidad; concretos ecológicos.

**Citar como:** Rendón Belmonte, M., Martínez Madrid, M., Martínez Pérez, R. V., Pérez Quiroz, J. T. (2019), “Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 200 – 214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, México.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

## Durability of concrete mixtures with different contents of activated fly ash

### ABSTRACT

This article describes properties related to the durability of five different mixtures of concrete with different contents of activated fly ash (AFA) and Portland cement (CPC 40). The measurements carried out were apparent speed of ultrasonic pulse, electrical resistivity, fast ion permeability of chloride and mechanical resistance to compression. The performance of all mixtures proved to be durable, and the development of the electrical resistivity and the decrease in the level of the chloride ion permeability were enhanced by the contents of AFA, although the resistance to compression at higher contents of AFA was minor. The maximum percentage of AFA to comply with the current criteria of durability was 65%.

**Keywords:** activated fly ash; durability; ecological concrete.

## Durabilidad de misturas de concreto con diferentes teores de cinzas volantes activadas

### RESUMO

Este artigo descreve propriedades relativas à durabilidade de cinco misturas de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas (CVA) e cimento portland tipo CPC 40. Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica aparente, permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão. A qualidade de todas as misturas foi duradoura, o desenvolvimento da resistividade elétrica e a diminuição do nível de permeabilidade ao íon cloreto foi favorecido pelo conteúdo de CVA, embora a resistência à compressão em maior conteúdo de CVA tenha sido menor. O percentual máximo de substituição do CVA para atender aos critérios atuais de durabilidade foi de 65%.

**Palavras chave:** cinza volante ativada; durabilidade; concreto ecológico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo moderno. Las estimaciones señalan que en el año 2050 el consumo de cemento Portland podría incrementarse hasta un 225% con respecto a los valores actuales, debido principalmente a la elevada demanda de este conglomerante por parte de países emergentes, como pueden ser India, China, Brasil y México (Garcés et al, 2012). De acuerdo con la CANACEM (cámara nacional del cemento) en el 2016 la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas y un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas.

Se sabe que la producción mundial de cemento de 1.6 millones de toneladas representa aproximadamente el 7% de la generación de dióxido de carbono en la atmósfera (Mehta, 2001, Nath et al, 2011). Aunado a esto, estructuras construidas con cemento portland en ambientes corrosivos, comienzan a deteriorarse después de 20 a 30 años, a pesar de que han sido diseñados para más de 50 años de vida de servicio (Chandra et al, 2015). Con la finalidad de reducir el uso de recursos naturales, cantidad de energía y emisiones de dióxido de carbono, se investiga el desarrollo de concretos ecológicos que además de ser amigables con el ambiente, proporcionen sustentabilidad y durabilidad para lograr una vida útil larga de las estructuras (Madhavi et al, 2014; Mishra, 2017).

Algunas opciones consideradas para lograrlo, es el reemplazo parcial de la cantidad de cemento portland (CP) en concreto con 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).

La ceniza volante es un subproducto industrial generado en gran cantidad en todo el mundo, casi 800 millones de toneladas anuales (Heidrich et al, 2013; International Energy Agency Coal Industry Advisory Board, 2014) pero una cantidad significativa de este material (alrededor del 50%) se deposita en vertederos, ocasionando un grave riesgo ambiental y disminución de la reactividad de la ceniza volante debido a las condiciones de intemperismo (Mishra, 2017).

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 disponible aún está limitado a un máximo del 35% de cemento en masa, basado en el argumento que porcentajes de reemplazo mayores de ceniza volante no mejora las características de resistencia en su forma natural (Hemalatha et al, 2017). Con la finalidad de mejorar las propiedades e incrementar los porcentajes de sustitución de ceniza volante, se han explorado diferentes enfoques, tales como: reducción de la relación agua / material cementicio, sustitución de cemento portland de alta resistencia inicial por cemento portland 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). Se han utilizado también 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 es definida como la activación por medio de un proceso de molienda o por medio de tamizado y separación de aire y la activación térmica se refiere al lento o rápido enfriamiento produciendo 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). Hoy en día el uso de la ceniza volante es considerado como una solución efectiva (Zobal et al, 2017).

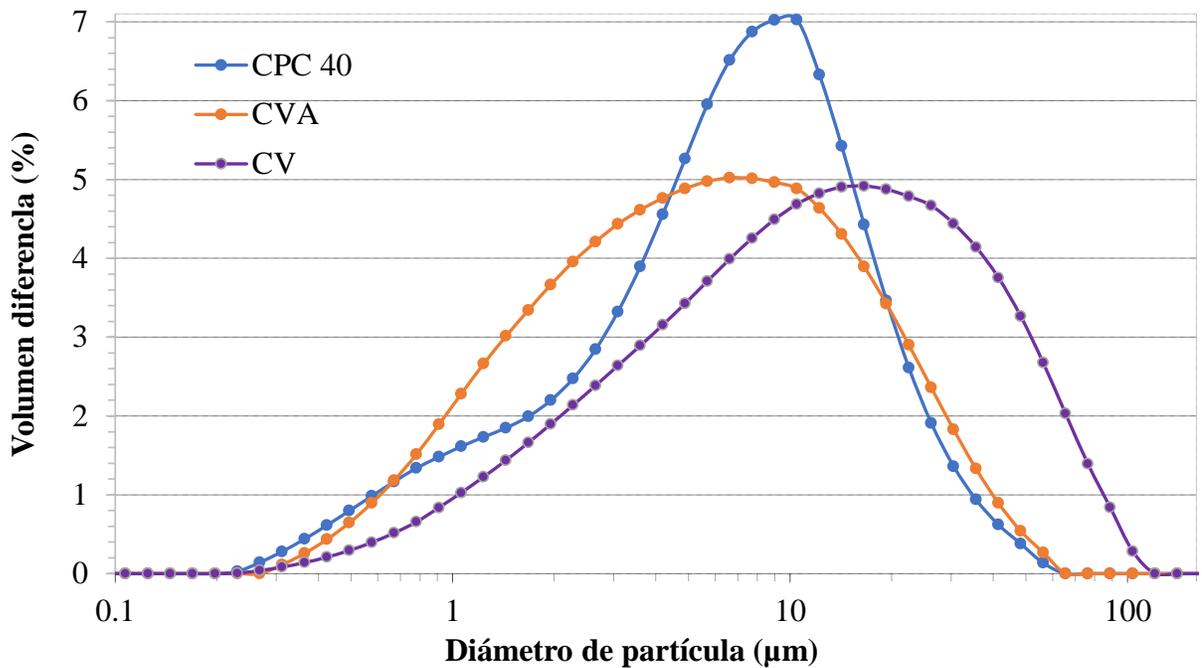
Considerando los antecedentes del uso de la ceniza volante, efectos positivos en las propiedades de los concretos, bajo costo y disponibilidad actual de ceniza volante en México (almacenada), este artículo se centra en determinar propiedades tales como: calidad del concreto (VPU), resistividad eléctrica aparente ( $\rho$ ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión, de mezclas con diferentes contenidos de cemento portland tipo CPC 40 (cemento hoy en día más comercial y empleado en la construcción) y ceniza volante mexicana sometida a un proceso de activación química mediante el uso de químicos en polvo y método de molienda, con el objetivo de mejorar su reactividad, contribuir y enriquecer información que promuevan su uso en el sector de la construcción civil en nuestro país. Debido a la existencia de un contrato de confidencialidad, la caracterización de las mezclas evaluadas todavía no se puede revelar.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

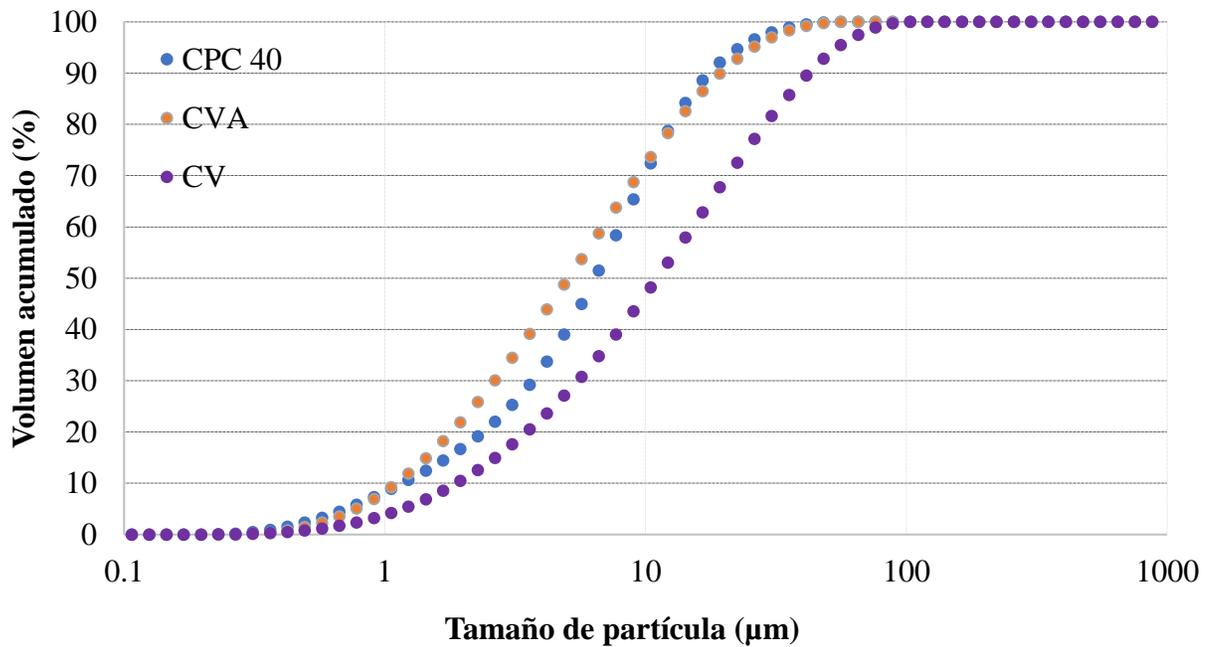
### 2.1. Materiales de partida

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó cemento portland tipo CPC 40 marca comercial, ceniza volante activada mediante la adición de químicos en polvo y molienda en molino de bolas (CVA), agregados producto de la trituración de roca caliza y agua de red potable.

La distribución de granulometría del cemento (CPC 40), ceniza volante empleada previo a la molienda (CV) y posterior a la molienda (CVA) se muestra en la Figura 1. Este análisis se obtuvo por láser scattering. La suspensión de partículas se preparó en etanol empleando como medio de dispersión un baño ultrasonido durante 5 minutos y se empleó la aproximación Fraunhofer.



1a) Distribución de partícula de los materiales de partida



2a) Tamaño de partícula de los materiales de partida

Figura 1. a) Distribución de partícula y b) tamaño de partícula de los materiales de partida

La Tabla 1 muestra características de los agregados utilizados, valores obtenidos de acuerdo con las Normas ASTM C127 y C128.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas

Material	Densidad (Kg/l)	Absorción (%)
Grava 5-20 mm (caliza triturada)	2.67	0.9
Arena 0-5 mm (caliza de mina/triturada)	2.40	2.40

## 2.2. Elaboración de probetas

Se fabricaron cinco mezclas con diferentes porcentajes de sustitución de CVA (0, 30, 50, 65 y 75%) respecto al peso de cemento denominadas como: M1, M2, M3, M4 y M5 respectivamente. La relación agua/material cementante fue 0,35. Para lograr esta relación se utilizó reductor de agua y aditivo fluidizante. Las proporciones de las mezclas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de las cinco mezclas.

Material	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5
Cemento CPC 40	Kg/m <sup>3</sup>	450	315	225	157.5	112.5
CVA	Kg/m <sup>3</sup>	0	135	225	292.5	337.5
Grava	Kg/m <sup>3</sup>	1006	1006	1006	1006	1006
Arena	Kg/m <sup>3</sup>	710	710	710	710	710
Condición de curado	°C	Cuarto de curado				
a/mc		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

\*mc: material cementicio (CVA+CPC)

De cada mezcla se obtuvieron 39 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-159-16, hidratadas con agua potable del suministro municipal y curado conforme a la norma NMX-C-148-10. Posterior al período de curado (28 días), todas las muestras se retiraron del cuarto de curado y se mantuvieron a temperatura ambiente y en condición húmeda, condición lograda con rociado de agua potable diario y resguardo en contenedores de plástico con tapa.

## 2.2. Ensayos de durabilidad

Los ensayos que se realizaron fueron: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) (ASTM C-597-02), resistividad eléctrica ( $\rho$ ) (NMX-C514-16), permeabilidad rápida al ión cloruro (ASTM C1202-10) y resistencia mecánica a la compresión (NMX C-083-02) a diferentes edades por un período de 122 días. Cabe mencionar que en cada edad de ensayo de VPU y resistividad eléctrica se evaluaron quince cilindros de cada mezcla, para el caso de la resistencia mecánica a la compresión se ensayaron tres cilindros y en la prueba de permeabilidad rápida al ión cloruro se evaluaron dos muestras.

## 3. RESULTADOS

A continuación, se describen los resultados de cada ensayo realizado.

### 3.1 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La Figura 2 presenta el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico.

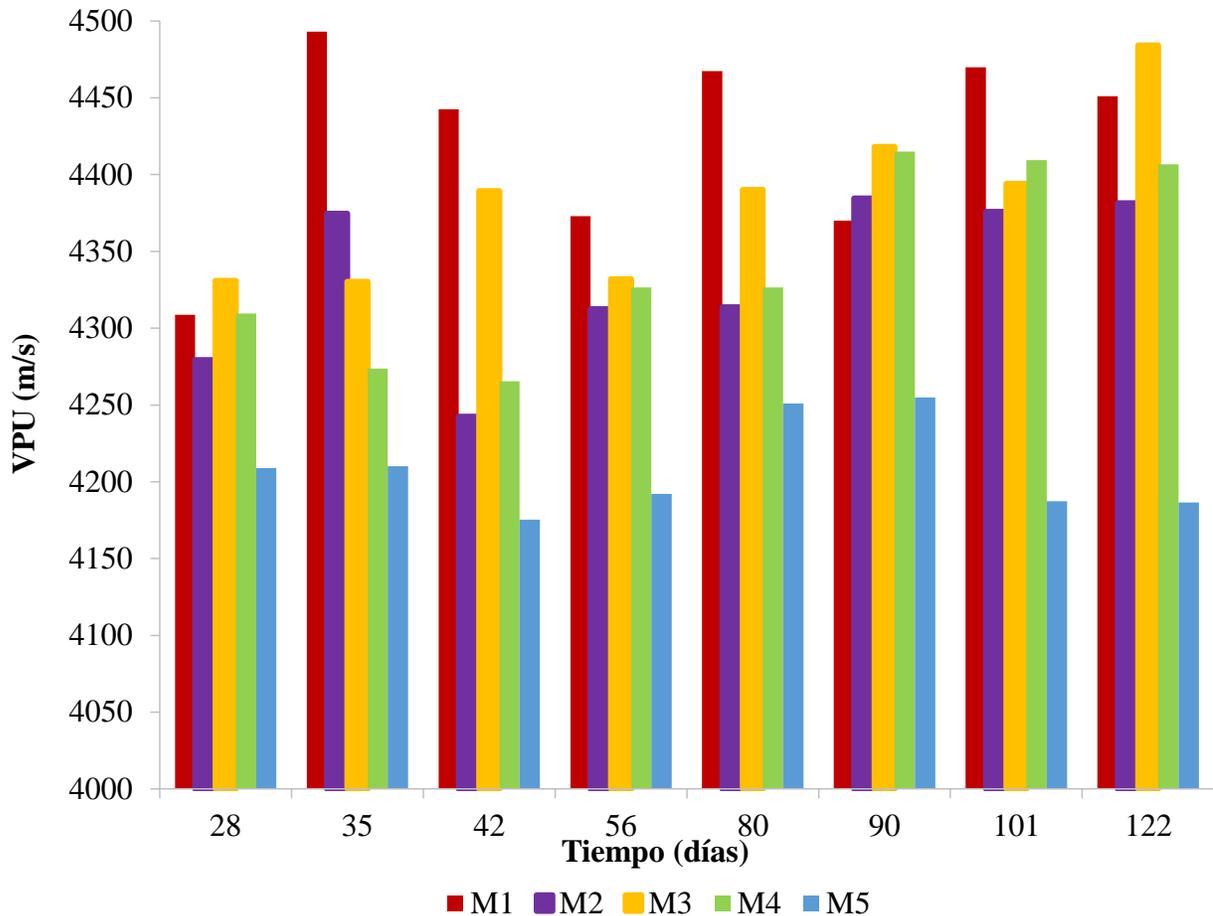


Figura 2. Velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

Los valores de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos en las cinco mezclas y todas las edades de ensayo, reportados en la Figura 2 resultaron superiores a 4000 m/s, indicando que la calidad en todos los casos resultó durable. No obstante, en la mezcla con mayor contenido de CVA (M5) se apreciaron valores menores respecto al resto de las mezclas, este comportamiento quizás sea consecuencia de la falta de hidróxido de calcio contenido en la mezcla y proporcionado por el cemento portland.

Considerando los resultados de VPU obtenidos en esta investigación con CVA e información reportada por Al-Amoudi quien evaluó mezclas de concreto con y sin reemplazo de cemento portland por ceniza volante (hasta un 40%) los valores oscilaron en el mismo orden  $\sim 4000$  m/s (Al-Amoudi et al, 1996).

### 3.2 Resistividad eléctrica ( $\rho$ )

La Figura 3 presenta el comportamiento de la resistividad eléctrica aparente de las cinco mezclas fabricadas respecto al tiempo. Cabe mencionar que la norma NMX C-514-16 define resistividad eléctrica aparente como la resistividad medida sobre el concreto no saturado con agua, condición en la que se obtuvieron las mediciones reportadas.

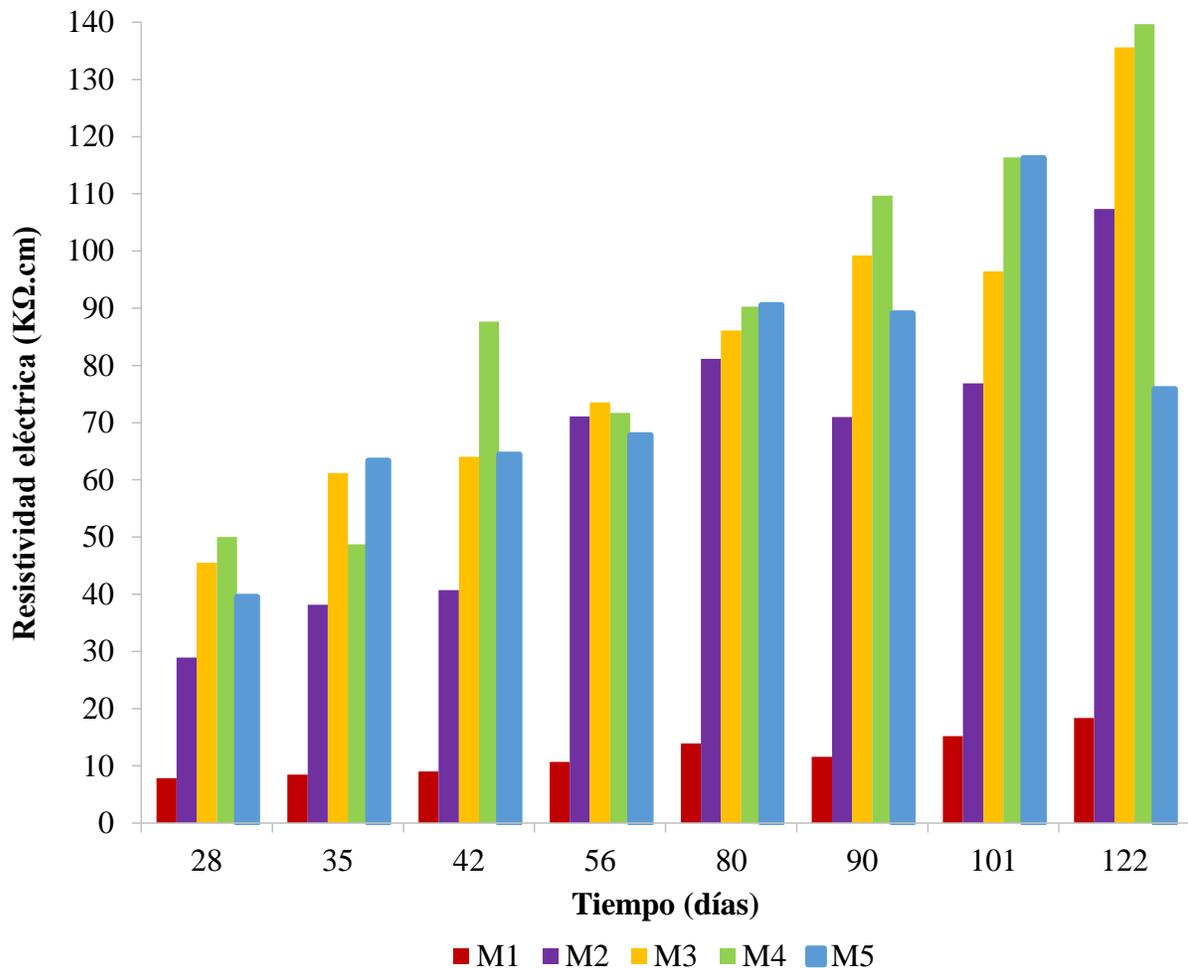


Figura 3. Resistividad eléctrica aparente a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

De acuerdo con la Figura 3, las mezclas con contenido de ceniza volante activada mostraron valores de resistividad eléctrica superiores a la mezcla sin contenidos de CVA (M1), mezcla que alcanzó un máximo de 18 KΩ.cm. Después de 122 días, M2 logró valores de 110 KΩ.cm, mientras las mezclas M3 y M4 alcanzaron valores cercanos a 140 KΩ.cm. En el caso de M5 se observó un decaimiento de resistividad en la medición del día 122, de valores de 116 a 76 KΩ.cm, fecha en la que también se observó un incremento en el valor de permeabilidad al ión cloruro como muestra la Figura 3. Este comportamiento se piensa que puede deberse a dos posibles causas: 1) a esta edad la reacción de la CVA es más sensible al contenido de humedad existente en la matriz del concreto, ralentizando su reacción o 2) el contenido de ceniza en la mezcla es excesivo para mantener una reacción constante de la CVA.

Sin embargo, aun con el descenso visto en la M5, los valores de resistividad eléctrica de las mezclas con CVA superaron los alcanzados con la mezcla M1 (0% ceniza volante).

Considerando los criterios establecidos en la norma mexicana NMX C-514-16 y valores de la Figura 3, la mezcla M1 mostró una porosidad interconectada de consideración, mientras las mezclas M2, M3 y M4 indicaron porosidad interconectada extremadamente baja y M5 porosidad interconectada baja.

### 3.3 Permeabilidad rápida al ión cloruro

La Figura 4 presenta el comportamiento de la prueba de permeabilidad rápida del ión cloruro de las cinco mezclas fabricadas. Los valores reportados corresponden a edades de 28, 56, 90 y 122 días.

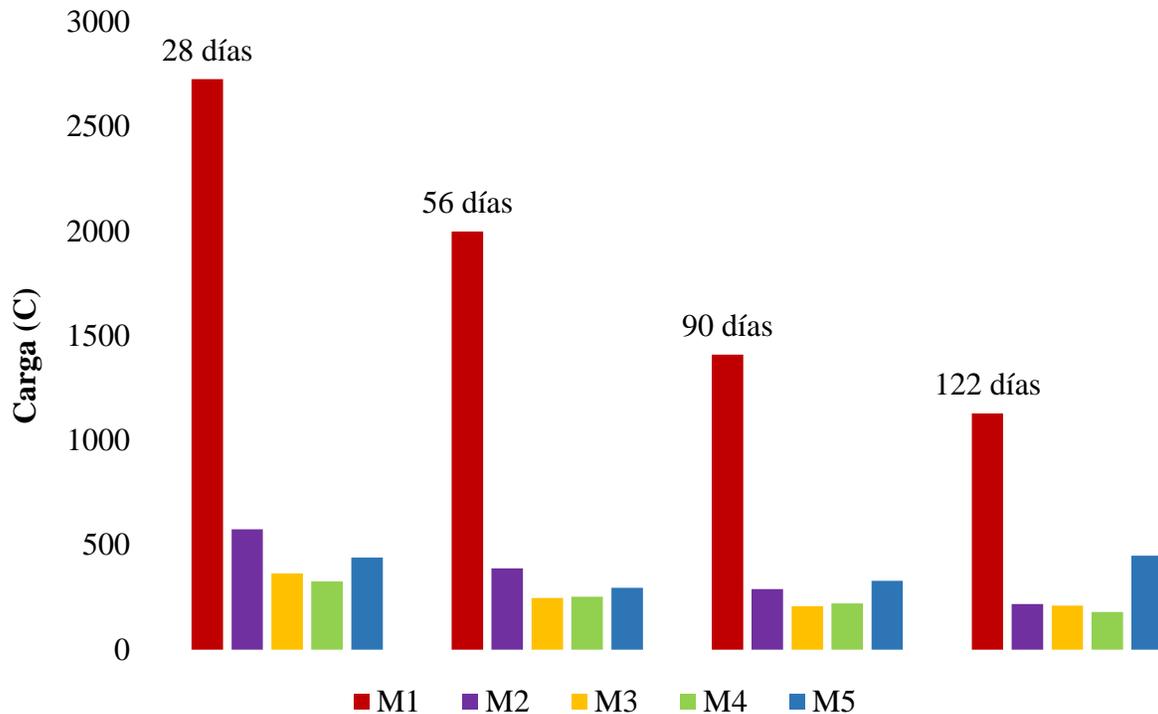


Figura 4. Permeabilidad rápida al ión cloruro a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

Tomando en cuenta los valores de la Figura 4 y criterios establecidos en la norma ASTM C-1202-12, los resultados de la mezcla sin ceniza volante activada (M1), inicialmente mostraron valores superiores a 2500 C, pero conforme el transcurso del tiempo disminuyó alcanzando después de 122 días valores de 1100 C, con estos valores esta mezcla alcanzó un nivel de penetrabilidad del ión cloruro moderado y posteriormente bajo.

Para las mezclas con contenido de ceniza volante activada, la cantidad de carga que pasó en todas las edades de evaluación resultaron menores a 500 Culombios (C), consiguiendo un nivel muy bajo de penetrabilidad del ión cloruro. La tendencia de permeabilidad respecto al tiempo de las mezclas M2, M3 y M4 fue descendente, solo para el caso de la mezcla M5 el comportamiento fue variable, pero en ningún tiempo superó los 500 C.

Las mezclas con contenido de ceniza volante activada mostraron menor permeabilidad al ión cloruro respecto a la mezcla sin ceniza volante activada, estos resultados coinciden con investigaciones que reportan que la presencia de ceniza volante promueve un nivel bajo de permeabilidad a este ión (Malhotra, 1990; Nath et al, 2011; Saha, 2018; Mittal).

### 3.4 Resistencia mecánica a la compresión

La Figura 5 muestra las resistencias mecánicas a la compresión y la desviación estándar ( $\sigma$  en MPa) obtenida a partir de tres ensayos por mezcla a edades de 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días, obtenidas conforme a la norma NMX-C-083-14.

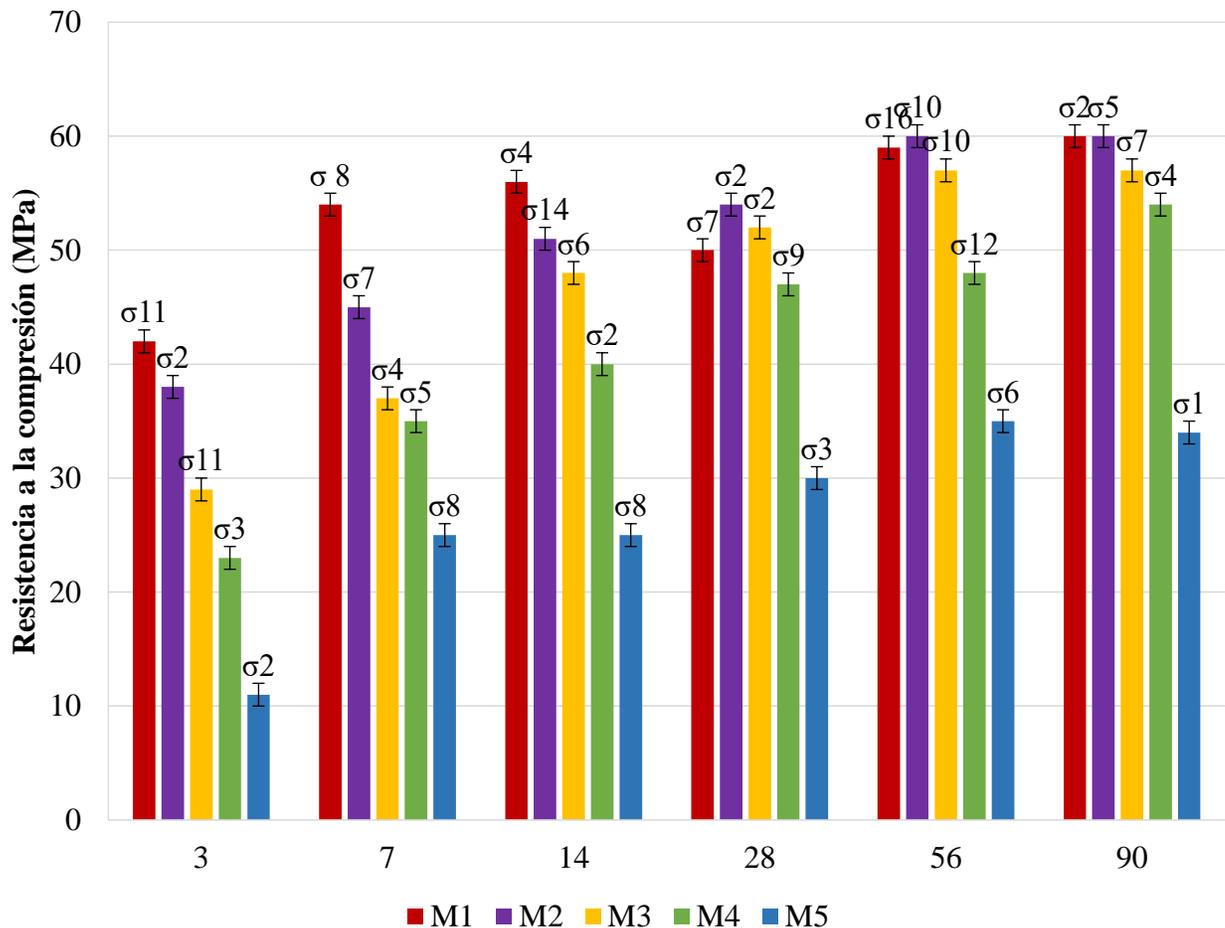


Figura 5. Resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

De acuerdo con la Figura 6, la resistencia a la compresión a edades tempranas (3 y 7 días) de las muestras con contenido de ceniza volante activada resultó menor respecto a las muestras control (0% de ceniza volante activada), sin embargo, con el paso del tiempo ascendieron gradualmente, comportamiento asociado con la lenta reacción puzolánica de la ceniza volante (Nath y Sarker, 2011; Mishra, 2017; Saha, 2018).

Los valores de resistencia mecánica de la mezcla M1 detuvieron su desarrollo después de 56 días con valores de 60 MPa. En el caso de las mezclas M2 y M3 después de 14 días fueron mayores a 45 MPa, mientras M4 después de 28 días. La mezcla M5, mostró valores de resistencia ascendentes con el tiempo, pero, en todas las edades la resistencia mecánica resultó menor al resto de las mezclas, consiguiendo valores máximos de 35 MPa, este resultado es atribuido principalmente a la falta de hidróxido de calcio en la mezcla (Saha, 2018), aportado principalmente por el cemento portland, que en este caso el contenido en la mezcla M5 fue del 25% respecto al peso total de material cementicio.

Los valores de resistencia a la compresión fueron menores a mayor contenido de ceniza volante activada en la mezcla, aunque, a la edad de 28 días las mezclas M2, M3 y M4 superaron los 45 MPa, valor de resistencia mecánica considerado para concretos considerados de elevada resistencia de acuerdo con el Manual de la Red Durar.

### 3.5 Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica a la compresión

La Figura 6 muestra el comportamiento de la resistividad eléctrica respecto a la resistencia mecánica de las cinco mezclas después de 7, 14, 28, 56 y 90 días.

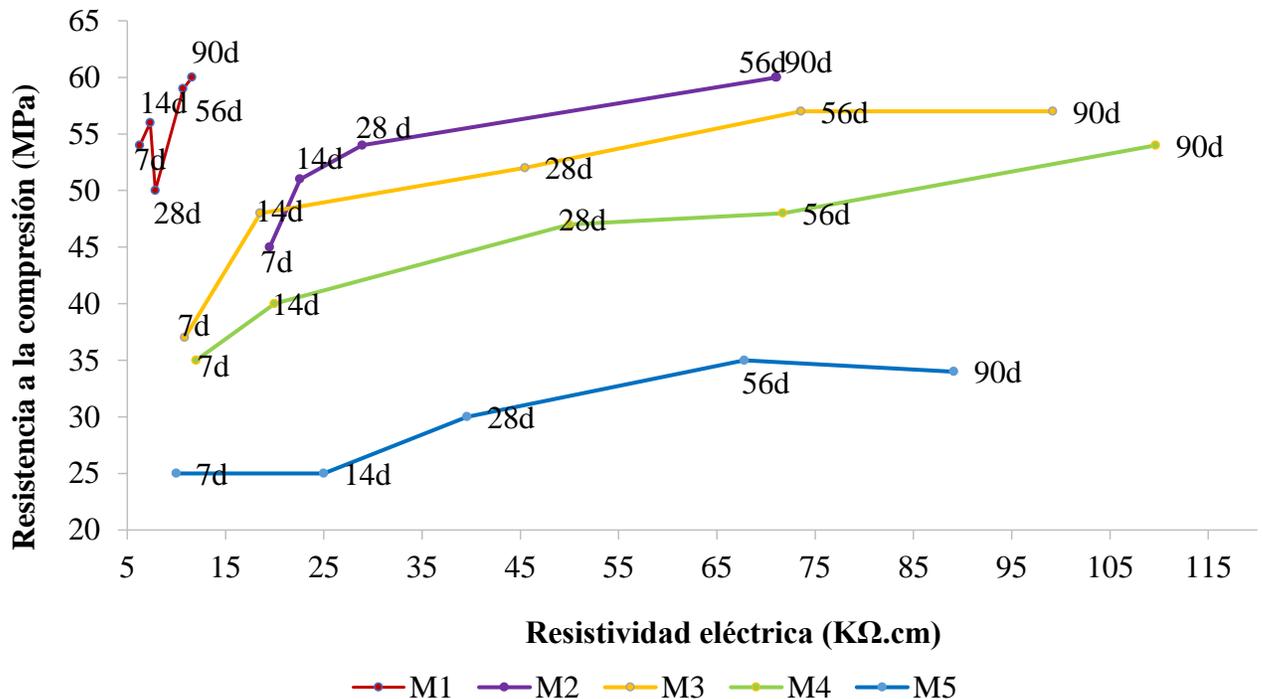


Figura 6. Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 7,14,28,56 y 90 días

De acuerdo con la Figura 6, la mezcla M1 mostró valores de resistividad eléctrica de manera ascendente respecto al paso del tiempo, el valor inicial (7 días) resultó ser de 6 KΩ.cm y la final (90 días) de 12 KΩ.cm. En cuanto a la resistencia a la compresión, la inicial fue de 54 MPa y la final de 60 MPa. Para este caso, aun cuando hubo incremento en ambos parámetros respecto al tiempo, no fue considerable como se observó en las mezclas con contenidos de ceniza volante activada (M2, M3, M4 y M5), donde fue evidente que a medida que el tiempo transcurrió, la resistividad eléctrica y resistencia a la compresión incrementaron. Este comportamiento progresivo, en las mezclas con contenidos de ceniza volante se atribuye al beneficio que brinda la ceniza volante en la compacidad del concreto respecto al tiempo.

En todas las mezclas se determinó que la evolución de la resistividad es paralela a la de la resistencia, comportamiento reportado también por Andrade (Andrade y D’Andrea, 2011).

Considerando que la resistencia mecánica a la compresión considerada para un concreto durable deber ser al menos > 45 MPa y una resistividad eléctrica >50 KΩ.cm, los porcentajes que cumplieron resultaron las mezclas con porcentajes del 30, 50 y 65% de CVA.

### 3.6 Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica

La Figura 7 muestra el comportamiento de compacidad del concreto (VPU) respecto a la resistencia mecánica de las cinco mezclas después de 7, 14, 28, 56 y 90 días.

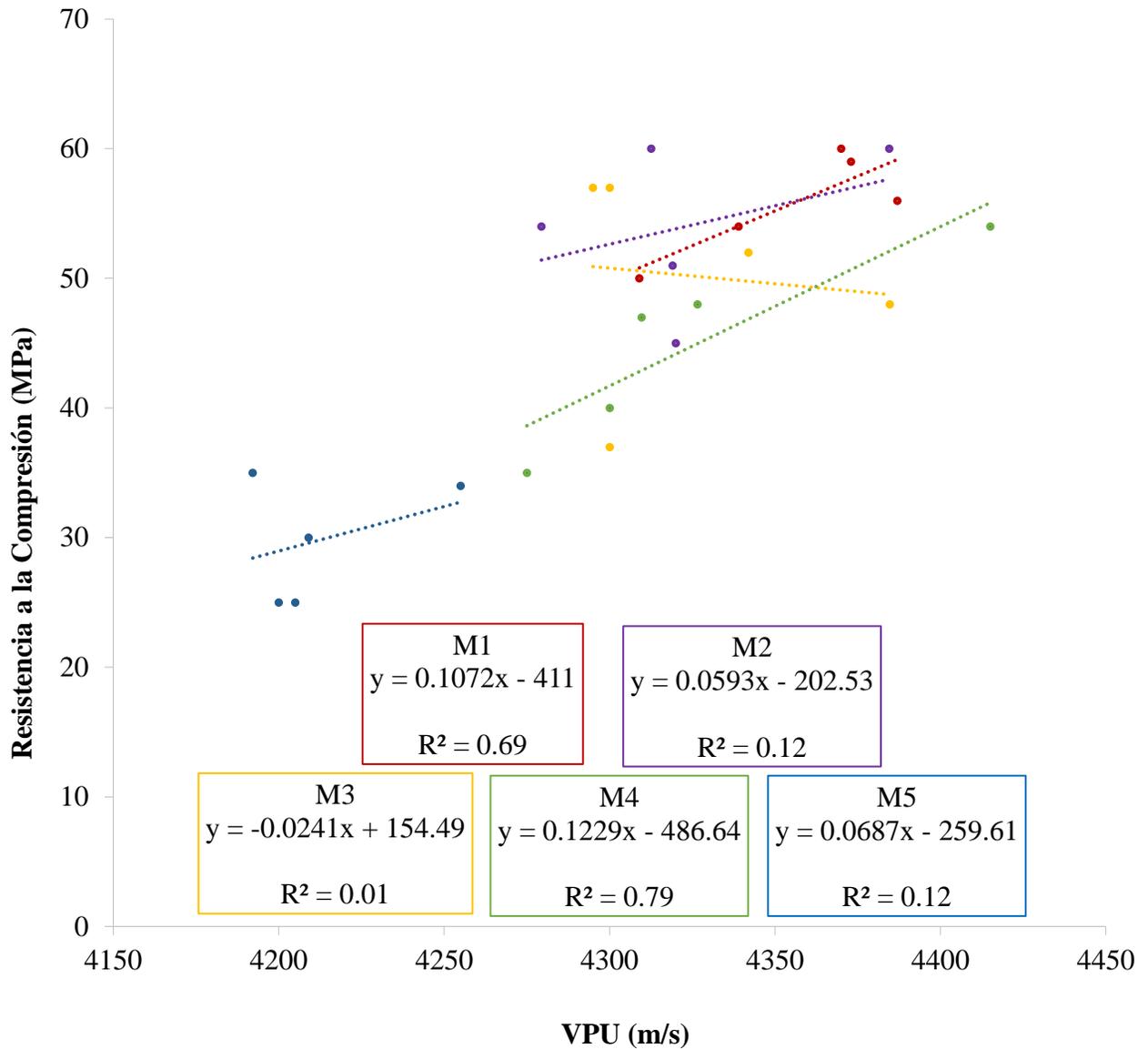


Figura 7. Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 7,14,28,56 y 90 días

De acuerdo con la Figura 7 se observó que las mezclas M1 y M2 se ubicaron en valores mayores a 4275 m/s y 45 MPa en todas las edades evaluadas. Para el caso de M3 y M4 en todas las edades los valores de VPU fueron mayores a 4275 m/s pero la resistencia a 7 días fue menor a 45 MPa, valor que con el transcurso del tiempo incrementó. Solo para el caso de la mezcla M5, los valores de resistencia mecánica y VPU resultaron menores respecto a las mezclas con y sin contenido de ceniza volante activada, comportamiento atribuido al alto contenido de ceniza volante (75%) y bajo contenido de hidróxido de calcio (25% CPC 40). A partir de estos resultados se observa que a valores de VPU menores a 4250 m/s las resistencias mecánicas obtenidas fueron menores a 35 MPa (M5) y cuando los valores de VPU superaron los 4250 m/s las resistencias resultaron mayores a 35 MPa. Sin embargo, observando los valores de R<sup>2</sup> indican que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia mecánica a la compresión, no son proporcionales, por lo tanto, es necesario valorar cada parámetro de manera independiente.

### 3.7 Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro

La Figura 8 demuestra que la resistividad eléctrica tiene correlación con la resistencia a la penetración de los cloruros. Se observó que a mayor resistividad eléctrica el nivel de permeabilidad resultó menor. Las mezclas con contenido de ceniza volante activada superaron los valores de resistividad eléctrica respecto a los obtenidos con M1 (mezcla sin ceniza volante activada) y como consecuencia el nivel de permeabilidad fue menor. Considerando que la resistividad del concreto aumenta con el tiempo debido al refinamiento de la estructura del poro (Andrade et. al., 2009), la presencia de la ceniza volante favoreció el refinamiento de la estructura poro originando menor permeabilidad.

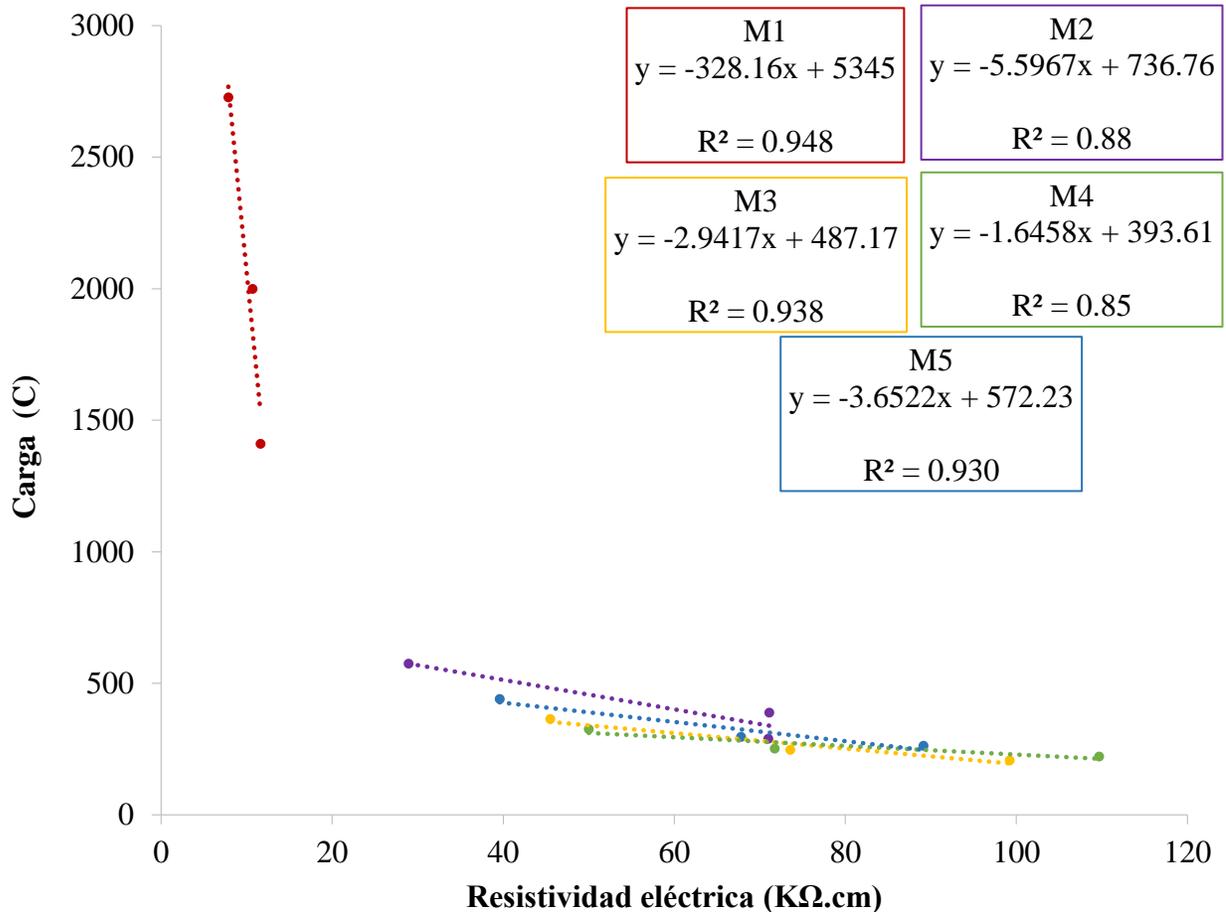


Figura 8. Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro de M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 28, 56 y 90 días

## 4. CONCLUSIONES

1. El uso de la ceniza volante activada como material de sustitución de cemento portland CPC 40 en mezclas de concreto, favorece el incremento de la resistividad eléctrica, por lo tanto, el transporte de agentes agresivos es mucho menor que en la mezcla sin adición de ceniza volante activada.
2. El nivel de permeabilidad del ión cloruro en las mezclas de concreto con contenidos de ceniza volante resultó muy bajo, esto expresa que la ceniza volante sometida a un

tratamiento químico y mecánico es favorable para alcanzar materiales poco permeables a este ión, lo que beneficia su durabilidad.

3. El comportamiento de la resistencia mecánica de las mezclas con porcentajes del 30, 50 y 65% de ceniza volante activada después de 28 días resultaron mayores a 45 MPa, esto apunta a que es posible fabricar concretos con un desarrollo sostenible para el sector de la construcción que no requiere resistencias altas a temprana edad.
4. Actualmente se estudia el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en las mezclas descritas, resistencia a sulfatos y la caracterización de los productos de reacción, resultados que se reportarán en trabajos futuros.

## 5. REFERENCIAS

- Al-Amoudi, O., Maslehuddin, M., Asi, I. (1996), "Performance and Correlation of the Properties of Fly Ash Cement Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, No. 2, pp. 71-77, DOI: <https://doi.org/10.1520/CCA10153J>. ISSN 0149-6123
- Andrade, C., D'Andrea, R. (2011), "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista ALCONPAT, V.1, No.2, pp. 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Andrade, C., d'Andréa, R., Castillo, A., Castellote, M. (2009), *The use of electrical resistivity as NDT method for specification the durability of reinforced concrete*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd
- ASTM International. (2002). *ASTM C597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- ASTM International. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0642-13>
- ASTM International. (2015). *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM International. (2015). *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- 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 November, 2015, Chittagong, Bangladesh
- DURAR (1998), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática Durabilidad de la armadura. 2a Edición
- Garcés, P., Zornoza, E., Baeza, F., Galao, O., Payá, J. (2012), "¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?", Revista ALCONPAT, V.2, No.2, pp. 57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2.i2.27>
- Hela R., Orsáková, D. (2013), "The Mechanical Activation of Fly Ash", Procedia Engineering V.65, pp. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.016>
- Heidrich, C., Joachim Feuerborn, H., Weir, A. (2013), "Carbon combustion products: a global perspective". World Conference of Coal Ashes, pp. 22-25. URL: <http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>

- Hemalatha, T., Ramaswamy, A. (2017), “*A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete*”, Journal of Cleaner Production, V.147, pp. 546-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- International Energy Agency (2014), “*The Impact of Global Coal Supply on Worldwide Electricity Prices*”. Report by the IEA Coal Industry Advisory Board, pp. 55, URL: [https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ImpactGlobalCoalSupply\\_WorldwideElectricityPrices\\_FINAL.pdf](https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ImpactGlobalCoalSupply_WorldwideElectricityPrices_FINAL.pdf)
- Lizarazo Marriaga, J., García, F., Higuera Flórez, C. (2015), “*Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química*”, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, V. 35, No.2, pp. 305-314. eISSN: 2244-7113
- Madhavi, T. Ch., Swamy Raju, L., Mathur, D. (2014) “*Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete*”, Journal of Civil Engineering Research, V. 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, Volume 12, Issue 4, Pages 271-277, DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90006-J)
- Malhotra, V. M. (1985), “*Métodos no destructivos para evaluar concreto*”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Moffatt, E., Thomas, M., Fahim, A. (2017), “*Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment*”, Cement and Concrete Research, V.102, pp. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>
- Mehta, K. (2001), “*Reducing the environmental impact of concrete*”, Concrete International, pp. 61-66. URL: <http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>
- Mehta, K. (2002), “*Greening of the concrete industry for sustainable development*”, Concrete international, 24 (7) pp. 23-28.
- Mishra, D. K., Yu, J., Leung, C. K. Y. (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.
- Mittal, A., Kaisare, M. B., Shetti, R. “*Experimental Study on use of fly ash in concrete*”, Tarapur Atomic Power Project 3 & 4, Nuclear Power Corporation of India Limited URL: [https://www.sefindia.org/forum/files/experimental\\_study\\_on\\_use\\_of\\_fly\\_ash\\_in\\_concrete\\_by\\_mr\\_amit\\_mittal\\_136.pdf](https://www.sefindia.org/forum/files/experimental_study_on_use_of_fly_ash_in_concrete_by_mr_amit_mittal_136.pdf)
- Mucsi, G. (2016), “*Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review*”, Journal of Silicate Based and Composite Materials, V. 68, No. 2, pp. 56-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- Nath, P., Sarker, P. (2011) “*Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*”, Procedia Engineering V.14, pp. 1149-1156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2010), *NMX-C-105-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*”.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2014), “*NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción Concreto Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Método de Ensayo*”.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2016), “*NMX-C-159-ONNCCE-2016: Concreto, elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*”.

- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2016), “*NMX-C-413-ONNCCE-2016: Industria de la Construcción Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico Especificaciones y Métodos de Ensayo*”.
- Palomo, A., Grutzeck, M., Blanco, M. (1999), “*Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*”, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 8, August, Pages 1323-1329, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Saha, K. A. (2018), “*Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*”, Sustainable Environment Research, Volume 28, Issue 1, January, Pages 25-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Sahoo, S., (2016), “*A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength*”, Journal of Basic and Applied Engineering Research, Volume 3, Issue 10; July-September 2016, pp. 883-887. e-ISSN: 2350-0255, <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html>
- Yu, J., Lu, C., Leung, C. K. Y., Li, G. (2017). *Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash*. Construction and building materials, 147, pp. 510-518. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- Zobal, O., Reiterman P., Plachý, T., Bittnar, Z. (2017), “*Durability of Concrete with Fly Ash from the Dam Orlik after 55 Years*”, Advanced Materials Research, V.1144, pp. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1144.81>