



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Caracterización fisicoquímica de concretos con contenidos del 30% de ceniza volante

Mariela Rendón Belmonte
Donato Sánchez Topete
Miguel Martínez Madrid
Abraham López Miguel

Publicación Técnica No. 618
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Mariela Rendón Belmonte, Ing. Donato Sánchez Topete, Dr. Abraham López Miguel y Dr. Miguel Martínez Madrid.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 18-20: caracterización fisicoquímica de concretos con contenidos del 30% de ceniza volante proveniente de la termoeléctrica de Petacalco

Se agradece a la comisión federal de electricidad el abastecimiento de ceniza volante para desarrollar esta investigación.

Contenido

	Página
Índice de figuras y gráficas.....	v
Índice de tablas.....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract.....	xi
Resumen Ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1 Antecedentes.....	5
2 Metodología experimental.....	17
3 Resultados.....	25
Conclusiones.....	37
Bibliografía.....	39

Índice de figuras y gráficas

Figura 2.1 Ensayo de resistividad eléctrica de muestras cilíndricas.....	17
Figura 2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	19
Figura 2.3 Ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro	20
Figura 3.1 Distribución de partícula de la ceniza volante	21
Figura 3.2- Difractograma de la ceniza volante	22
Figura 3.3 Micrografía de la ceniza volante.....	23
Figura 3.4 Análisis por EDS de la ceniza volante.....	24
Figura 3.5 Mapeo químico obtenido por EDS de la ceniza volante	24
Gráfica 3.1 Resultados de resistividad eléctrica.....	25
Gráfica 3.2 Velocidad de pulso ultrasónico	26
Gráfica 3.3 Permeabilidad rápida al ion cloruro.....	27
Gráfica 3.4 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 250 kg/cm ²	28
Gráfica 3.5 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 350 kg/cm ²	29
Gráfica 3.6 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 450 kg/cm ²	30

Índice de tablas

Tabla 2.1 Características de los materiales de partida.....	15
Tabla 2.2 Diseño de mezclas	15
Tabla 2.3 Mezclas de concreto fabricadas	16
Tabla 2.4 Criterios de evaluación para ensayo de resistividad eléctrica [55]	18
Tabla 2.5 Criterios de evaluación para el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) [56].....	19
Tabla 2.6 Criterios de evaluación para el ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro [57].	20
Tabla 3.1 Valores promedio de diámetros de la ceniza volante	21
Tabla 3.2 Cuantificación de fases y parámetros de red de la ceniza volante	22

Sinopsis

Esta investigación presenta la caracterización fisicoquímica de mezclas de concreto con diseños: 250, 350 y 450 Kg/cm² con contenidos del 0 y 30% de ceniza volante proveniente de la termoeléctrica de Petacalco. Describe las propiedades de mezclas de concreto en estado endurecido (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico (VPU), permeabilidad rápida al ion cloruro y resistencia a la compresión) obtenidas por un período de 240 días. Las muestras evaluadas fueron cilindros de dimensiones de 10 x 20 cm y cubos de 10 cm x 10 cm x 10 cm.

Los resultados demuestran que las mezclas con contenidos del 30% de ceniza volante desarrollaron mayor resistividad eléctrica y menor nivel de permeabilidad al ion cloruro respecto a las mezclas sin contenidos de ceniza volante. La calidad del concreto resultó durable en todas las mezclas. En cuanto al desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión, fue menor en las mezclas de concreto con contenidos de ceniza volante, siempre, sobresalieron las mezclas de concreto sin contenidos de ceniza volante, aunque se cumplió con la resistencia del diseño.

Con base en estos resultados, se confirma que la ceniza volante mexicana es viable para su uso en concretos, no obstante, con el objetivo de optimizar su reactividad y alcanzar valores superiores de resistencia mecánica a la compresión a edades tempranas, ésta deberá recibir un tratamiento de activación ya sea químico o mecánico previo a su uso.

Abstract

This research presents results of ultrasonic pulse velocity (VPU), real electrical resistivity (ρ), rapid permeability to chloride ion and mechanical strength at different ages of portland concrete mixtures type CPC 40 R and with different contents of fly ash. The results indicate that the ash content in the mixtures positively affects the development of electrical resistivity, low permeability to the chloride ion and mechanical resistance to compression.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se evaluó el comportamiento de mezclas de concreto fabricadas con contenidos del 30% de ceniza volante activada y cemento portland CPC 40 R, con el objetivo de valorar las propiedades de durabilidad.

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.

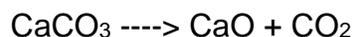
Capítulo 3: Presenta los resultados y la discusión de los mismos, haciendo un comparativo, en función de la mezcla de concreto obtenida con 100% de cemento portland tipo CPC 40 R.

Capítulo 4: Contiene las conclusiones logradas en el estudio.

Introducción

A nivel mundial, se trabaja continuamente en la concientización del uso adecuado y racional de los recursos naturales (evitar su sobre explotación), contribuir con el cuidado del medio ambiente para minimizar los niveles de contaminación, generación de basura e impulsar el uso de recursos disponibles que proporcionen sustentabilidad. El protocolo de Kioto [1] establece los gases contaminantes que afectan la huella de carbono, siendo el CO₂ el principal y más dañino, pues no solamente favorece el calentamiento global, sino que también es uno de los causantes de deterioros ambientales en concreto por la acidez que genera. Al darse condiciones propicias, el CO₂ se combina con agua, puede llegar a formar ácido carbónico el cual altera el pH del concreto. Aunado a lo anterior la presencia de otros elementos ambientales, tales como el cloruro y/o sulfuro e incluso bacterias, pueden conllevar a deterioros prematuros de estructuras civiles, en particular aquellas fabricadas con concreto.

Dentro de los trabajos relevantes a nivel global sobre la “huella de carbono” se trabaja en investigaciones inherentes a los gases de efecto invernadero (GEI), que son liberados al medio ambiente producto de todas las actividades directas o indirectas del ser humano [2]. La producción del cemento va acompañado de la emisión a la atmosfera 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.



Entonces, de manera “directa” el total de emisiones de CO₂, está relacionada al proceso de producción del clínker mismo. Si a esto se le suma la emisión de CO₂ indirecta producto de la electricidad empleada con la molienda de materiales o en traslado de los insumos a la cementera, se estima que por cada tonelada de cemento que se fabrica actualmente, se emite a la atmosfera 1 tonelada de CO₂. Por más de 50 años esta ha sido la considerada como la “regla de oro” [2].

Según Arturo Gaytán Covarrubias, en su Conferencia sobre Tecnología de Concreto en Tiempos de Sostenibilidad, Mayo 2020, actualmente se han alcanzado cifras prometedoras de emisiones de <700kg de CO₂ por tonelada de cemento, gracias al empleo de energías alternativas y de procesos de calcinación más efectivos tecnológicamente hablando. Este gas no solamente es uno de los contribuyentes más dañinos en favorecer el calentamiento global, sino que también es uno de los causantes de deterioros ambientales en concreto por la acidez que genera. Al darse condiciones propicias, el CO₂ se combina con agua, puede llegar

a formar ácido carbónico el cual altera el pH del concreto para dañarlo de tal manera de reducir su vida útil. La presencia de otros constituyentes ambientales o de iones presentes en la naturaleza (Cl. S, bacterias), pueden aunarse al efecto del CO₂ y afectar sensiblemente la vida remanente de cualquier obra de infraestructura. A nivel mundial, se trabaja continuamente en la concientización del uso adecuado y racional de los recursos naturales (evitar su sobre explotación), contribuir con el cuidado del medio ambiente para minimizar los niveles de contaminación, generación de basura e impulsar el uso de recursos disponibles que proporcionen sustentabilidad.

De acuerdo con Ceballos Arana [3] el concreto es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo con una producción mundial cercana a los 13,000 millones de m³ por año. Desafortunadamente estructuras construidas con cemento portland expuestas en ambientes agresivos, comienzan a deteriorarse a temprana edad, o en el mejor de los casos después de 20 a 30 años a pesar de que han sido diseñados para una vida de servicio superior a los 50 años [4]. Un ejemplo de esto, es el estado que presentan los puertos federales en México [5], mejor conocidos como Administración Portuaria Integral (API).

En los últimos 20 años (1998-2018) México se ha ubicado dentro de los 15 países con mayores emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en el mundo. En toda América Latina, México y Brasil han sido los principales responsables de estas emisiones [6]. En México, de acuerdo con el inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero el sector de la industria del cemento tiene un impacto [7]. En este caso particular, la producción del cemento va acompañado de la emisión a la atmosfera 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. Las estadísticas muestran que la cantidad de producción de dióxido de carbono es casi una tonelada por cada tonelada de cemento producida. De acuerdo a la CANACEM (cámara nacional del cemento) en México en el 2019, 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.

En busca del uso de materiales que brinden durabilidad y sustentabilidad a la obra civil en México además de un bajo costo, se encuentra la ceniza volante, material que hoy en día sigue siendo almacenado como producto de deshecho en instalaciones de las termoeléctricas de la empresa nacional que genera energía eléctrica, llamada Comisión Federal de Electricidad (CFE). Principalmente tres termoeléctricas utilizan carbón como combustible: CFE Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles, CFE CT Carbón II y CFE CT José López Portillo. De acuerdo con datos del 2018 la producción de ceniza volante le, de acuerdo con datos del 2018 la producción de ceniza volante en México fue: 519 796 480 Kg, 924 817 390 Kg y 278 166 000 Kg utilizando o dándole salida solo l 0.8, 16 y 11% respectivamente. La CV es uno de los tipos de adiciones activas empleadas en la

fabricación de cementos y concretos, este residuo es precipitado electrostáticamente de los humos escapados de las estaciones de fuerza motriz que funcionan a base de carbón y es la puzolana más común.

Conocido que la CV es un producto de deshecho, que por su reactividad y su contenido de SiO_2 puede llegar a ser benéfica, este trabajo se centra precisamente en estas consideraciones de funcionalidad, aunque enfocándose principalmente en el tema de la durabilidad del concreto resultante. Se detallan las propiedades de durabilidad que se producen respecto al tiempo en mezclas de concreto con porcentajes de sustitución del cemento portland por 0 y 30% de ceniza volante mexicana en su estado natural. Las pruebas que se describen son velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica real, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión a diferentes edades (durante 200 días).

I.1 Objetivo

Investigar si el uso de la ceniza volante procedente de la termoeléctrica de Petacalco es una alternativa sustentable, durable y económicamente competitiva, como material sustituto de cemento portland en mezclas de concreto.

1. Antecedentes

A continuación, se mencionan algunas investigaciones que reportan el efecto de la ceniza volante (CV) en concretos de cemento portland:

Macinnis, 1971 [8] estudiaron el efecto de cuatro tipos de adiciones: ceniza volante, agentes reductores de agua, un agente de arrastre de aire y polvo mineral de piedra caliza en relación a la resistencia-porosidad de la pasta de cemento Portland. Reportan que la porosidad es el parámetro de resistencia más importante, independientemente de la presencia de aditivos.

Montgomery et al., 1981 [9] realizaron un estudio preliminar para identificar los mecanismos por los que la incorporación de cenizas volantes influyen en la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto. El estudio sugiere que a temprana edad el comportamiento de resistencia a la compresión es meramente un fenómeno físico más que químico. Sin embargo, a edades mayores (10-12 semanas) el incremento a la resistencia a la compresión se debe al efecto puzolánico de la ceniza volante.

Thaulow, 1985 [10] estudió el proceso de hidratación de mezclas de cemento con ceniza volante y concluye que la mayoría de las partículas más gruesas en la ceniza volante no se hidratan, pero sin embargo cumplen una función importante como "microagregados" al incrementar la densidad de la mezcla, por lo que debería apreciarse como un micro concreto. Las fracciones hidratadas y más finas de las partículas de las cenizas volantes incorporadas en la matriz de partículas hidratadas de cemento, constituyen una parte esencial del micro concreto como verdadera pasta.

Ho & Lewis [11] determinaron la eficacia de la ceniza volante en mezclas de concreto con varias proporciones usando tres cementos diferentes y ceniza volante de tres fuentes diferentes. La eficacia de la ceniza volante la define como la proporción del cemento sustituido por la cantidad de ceniza volante añadida siempre y cuando se mantengan las propiedades del concreto. El comportamiento con respecto a la fuerza a la compresión alcanzada en las muestras (20 - 40 MPa) sugiere que cada ceniza volante es diferente y que aun con la misma ceniza volante, el comportamiento depende del cemento usado. Observando que la reacción puzolánica, aunque contribuye en gran medida a la resistencia a la compresión a largo plazo, tiene poca influencia en las tasas de carbonatación. Concluyen en que un curado prolongado puede aumentar en gran medida la eficacia de las cenizas volantes en su resistencia a la compresión y que este no es necesariamente igual a su efectividad de resistencia a la carbonatación.

Wei, Fajun, 1985 [12] hicieron un estudio de comparación de dos tipos diferentes de ceniza volante (tipo C y F) y evaluaron los efectos durante la hidratación temprana y la naturaleza de las superficies de las cenizas volantes. Concluyeron que las cenizas volantes de clase C y clase F no solo retrasaron la hidratación del C_3S sino también la del C_3A en el cemento tipo I. Reportan que existe un efecto primario de disminución del calor liberado debido a la adición de cenizas volantes en la mezcla de cemento, esto como efecto de dilución debido a la disipación parcial de un material menos reactivo. Las cenizas volantes con alto contenido de calcio tipo C resultaron más reactivas, así una gran cantidad de aluminio está disponible para la formación de la fase AFt en la mezcla de cemento de cenizas volantes de clase C, en relación con la mezcla de cenizas volantes de clase F.

Marsh et al., 1985 [13] Realizaron una medición de permeabilidad de pastas de cemento saturadas y endurecidas con y sin ceniza volante. Estas se curaron en un periodo de 7 días a 1 año en un rango de temperatura de 20°C a 65°C. Concluyen que la reacción puzolánica de la ceniza volante en las muestras de cemento causa reducciones sustanciales de permeabilidad. Esta reducción puede llegar a ser de hasta tres órdenes de magnitud cuando se compara con muestras de cemento portland de curado idéntico y con la misma proporción de agua/sólidos.

Mehta, 1985 [14] realizó un estudio de caracterización de propiedades físicas y químicas de la ceniza volante para conocer cuales influían de manera significativa en el comportamiento de las mezclas con cemento portland y ceniza. Menciona que la ceniza volante producida en centrales térmicas generalmente es baja en carbono <5%, altas en silicio >75% y tienen una distribución de tamaño de partícula fina de >40% por debajo de 10 μm y <20% arriba de 45 μm , características adecuadas para su uso como sustituto de cemento en mezclas de concreto. Menciona que la mayoría de elementos químicos en la ceniza volante parece no tener efecto sobre su reactividad, excepto el contenido de calcio, en donde a mayor contenido de calcio la reactividad es mayor, esto atribuido a la posible presencia de compuestos cristalinos reactivos como el C_3A (Aluminato de calcio). Menciona que cenizas con contenido normal de carbono, silicio y calcio, la distribución del tamaño de partícula es un parámetro importante en la reactividad de la ceniza volante. Encontró que la reactividad es directamente proporcional al tamaño de partícula <10 μm e inversamente a tamaños de partícula de >45 μm .

Ravina, 1986 [15] estudió el efecto de reemplazar el 35% y 50% del cemento por ceniza volante (clase F y C) en la trabajabilidad, el consumo de agua y el tiempo de fraguado. La trabajabilidad de las mezclas con ceniza volante fue mejor respecto a las muestras control (sin ceniza volante), el agua requerida para obtener un revenimiento de diseño de 5 cm en todas las mezclas se redujo en un 5 a 10%. La tasa de exudación en las mezclas de concreto con ceniza volante ligeramente mayor a igual a la muestra de control dependiendo del tipo de ceniza y proporciones en la mezcla. Respecto al tiempo de fraguado, este se retrasó en ambos casos de mezclas con ceniza volante (Tipo C y F). El efecto de la ceniza volante en el tiempo de fraguado puede ser tanto químico como físico. Químicamente las cenizas volantes pueden afectar el proceso de hidratación del cemento o entre estas

reaccionar y físicamente cuando hay más partículas finas de ceniza, incluso si no reaccionan, pueden servir como núcleos para el crecimiento y acumulación de los productos de hidratación del cemento.

Santiago, 1988 [16] reporta que la ceniza volante (CV) está compuesta de partículas de tamaños variables entre 1 y 150 μm . La incorporación de CV al concreto reduce el costo y mejora algunas de sus propiedades como trabajabilidad, impermeabilidad y su resistencia al ataque químico. Menciona que las normas limitan la finura para su aplicación, estableciendo un valor máximo del retenido en el tamiz de 45 μm . La UNE limita al 40%, la británica en 12.5% y la americana a un 34%. En el caso de la norma española se limita a un 15 % del máximo retenido en un tamiz de 90 μm . Al incorporar CV como sustituto de cemento, la cantidad de ceniza volante que sustituya al cemento debe oscilar entre el 15 y 35% y las resistencias mecánicas a corto plazo son inferiores a las de un concreto sin cenizas con igual cantidad de producto cementicio pero a largo plazo estas pueden superar a la de estructuras fabricadas sin cenizas. La permeabilidad disminuye cuando se incorporan cenizas y la resistencia a sulfatos es mejorada.

Tamez, 1988 [17] estudió el efecto del dióxido de carbono en morteros con 25% de ceniza volante y distintas relaciones a/c utilizando cemento portland tipo uno y ceniza volante proveniente de la planta número uno de la termoeléctrica de Río escondido en Coahuila, con agregados provenientes del “Cerro de las Mitras”, Monterrey. Concluyó que al aumentar la relación A/C la porosidad incrementó para morteros no carbonatados mientras en los morteros carbonatados la porosidad disminuyó, tanto en los morteros con y sin ceniza volante. En cuanto a la resistencia a la compresión a 28 días no hubo una diferencia significativa en los morteros con ceniza y sin ceniza, aunque morteros con ceniza volante presentaron una menor velocidad de carbonatación con respecto al mortero sin ceniza.

Luxan et al., 1989 [18] reportan un estudio de la evolución de la reacción del hidróxido de calcio con la ceniza volante durante el tiempo. Seleccionaron muestras de ceniza volante de estaciones eléctricas de España, evaluadas sin tratamientos previos (tamizado o molienda). La prueba consistió en poner en contacto los diferentes tipos de ceniza volante en una solución saturada de cal a 40°C y durante un periodo de 28 días. Encontraron entre los productos de reacción existe hidrato de aluminio y calcio, específicamente C_4AH_{13} , así como el carboaluminato $\text{C}_4\text{AOH}_{11}$ y monosulfoaluminato $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ encontrados en la muestra a 2 y 7 días. Consideraron también la formación de aluminatos hidratados que generalmente se llaman C_xAH_y y CACH.

Malhotra, 1990 [19] evaluó los aspectos de durabilidad en concretos con sustitución parcial de ceniza volante de un 54% a 58% del total de la masa cementicia. El cemento portland empleado fue del tipo I y dos tipos de ceniza a las que designaron L y S. Las probetas fueron expuestas 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. En 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 ser controladas 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.

Jiang and Malhortra 2000 [20] buscaron refinar las mezclas con ceniza volante para así excluir la necesidad de utilizar superplastificantes el cual ocasiona que su costo sea elevado. Los resultados demostraron que se puede lograr una reducción de agua debido a la incorporación de ceniza volante en grandes volúmenes de concreto, estas reducciones fueron del 8.8% hasta el 19.4%; dependiendo de la ceniza que se utilizó.

Poon, Lam, and Wong 2000 [21] estudiaron concretos con cenizas volantes tipo F en proporciones de 0%, 25%, 45% de la masa total de materiales cementosos. Estudiaron la resistencia a la compresión, calor de hidratación, difusividad de cloruros, grado de hidratación y estructuras de poros de cenizas volantes. Obtuvieron un concreto con menor calor de hidratación y difusividad de cloruro en comparación con el concreto de control, además de una resistencia a la compresión de 80 MPa a los 28 días con un contenido de ceniza volante de 45%.

Montemor et al., 2000 [22] reporta que el uso de cenizas volantes en la sustitución parcial de cemento conduce a una mayor resistividad del concreto. Este efecto fue cuantificado tanto por inmersión completa como parcial. Para las condiciones 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.

Siddique 2003 [23] investigaron el efecto del remplazo de cemento con altos volúmenes de ceniza volante clase F y las propiedades del concreto. Utilizaron reemplazo de cemento con porcentajes de ceniza del 40, 45 y 50% en masa. Los resultados arrojaron que, al sustituir la ceniza volante en el concreto, redujo la resistencia a la compresión, pero hubo una mejora significativa más allá de los 28 días. Reportan que la resistencia a los 28 días es suficiente para usar en concreto reforzado.

Durán Herrera Alejandro, 2004 [24] 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.

Javier, 2005 [25] observó que las cenizas volantes disponibles en México no tienen la finura deseable para aplicaciones en concretos, por lo que su eficiencia en mezclas de concreto es incierta.

Pedro et al., 2007 [26] evaluaron propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y abrasión, propiedades del concreto fresco (revenimiento, consistencia, contenido de aire, tiempo de fraguado) de concretos con altos contenidos de ceniza volante. Determinaron que las bajas relaciones a/c que obtuvieron gracias a la ceniza volante, les permitió disminuir el porcentaje de la fracción por secado pero la resistencia a la abrasión presentó una ganancia. En cuanto a la resistencia a la compresión superando a los concretos comerciales de 25MPa. Confirman el beneficio de la ceniza volante cuando es agregada a los concretos, tanto para la resistencia mecánica y en lo económico.

Paniagua, 2007 [27] estudió el desempeño de la ceniza volante como material cementante complementario en concretos con cemento portland. Observó que aun cuando utilizó las mismas cantidades de agua y aditivos, la ceniza volante no mejoró la trabajabilidad del concreto.

Sahmaran and Ozgur Yaman 2007 [28] estudiaron los efectos del reemplazo de ceniza volante en las propiedades frescas y endurecidas en concretos autocompactables que incorporaron diferentes tipos de fibras de acero. Reportan que la incorporación de ceniza volante redujo el requerimiento de agua en la mezcla, el uso de grandes cantidades de ceniza volante aumentó las características de trabajabilidad, aunque el uso de ceniza volante causó pérdidas significativas de resistencia en las mezclas de concreto.

Silverio, 2008 [29] menciona que la ceniza volante puede ser utilizada en la mezcla de concreto de un 15 a 20% del volumen total del cemento, lo cual aumenta notablemente la resistencia del material.

Bas 2008 [30] estudió la influencia de la ceniza volante empleando porcentajes del 0, 15 y 35% como sustituto parcial de cemento portland. Los resultados indican que el uso de la ceniza volante retarda la difusión de dióxido de carbono (CO_2) en el concreto a los 28 y 56 días debido al contenido libre de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$. En la prueba de penetración del ión cloruro, observaron que al aumentar el volumen de la ceniza volante disminuye la penetración de este ión debido a la reducción de porosidad producidas por la adición de la ceniza volante. En cuanto a la resistencia a la compresión indicaron que el aumento de cenizas del 15% al 35% no modifica significativamente el comportamiento mecánico del material.

Medina et al., 2010 [31] caracterizaron una ceniza volante mexicana de la termoeléctrica José López Portillo y 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 y/o geopolímeros.

Caballero et al., 2010 [32] mencionan que el uso de la ceniza volante en porcentaje del 25% inhibe el progreso de la reacción álcali sílice (RAS).

Sanchez, 2011 [33] realizó estudios en vigas de concreto reforzado con porcentajes de sustitución de ceniza volante del 20, 40 y 60 %) además de la referencia (0%

CV) y dos relaciones agua/cementante (0.50 y 0.60). Monitoreo la resistencia a la compresión y módulo elástico del concreto. Concluyó que la ceniza volante como sustituto parcial del cemento en una viga de concreto reforzado no afecta en gran medida las capacidades de carga, resistencia a compresión ni el módulo de elasticidad del concreto, pero hasta un porcentaje de sustitución que pudiera ser de un 20 a 40% de sustitución, ya que al incrementar el contenido de ceniza volante se reduce la capacidad de carga máxima. Determinó también que a mayor edad de prueba hubo un incremento considerable en la capacidad de carga máxima, asociado a la reacción puzolánica de la ceniza volante.

Pati et al., 2012 [34] reportan que la resistencia del concreto disminuye con el aumento del porcentaje de reemplazo del cemento con cenizas volantes a los 28 días. Pero, a los 90 días, se obtuvo la resistencia máxima para un 10% de adición de cenizas volantes.

Uysal et al., 2012 [35] 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%. El mejor resultado a 90 días de resistencia a la compresión fue con un 20% de ceniza volante como sustituto parcial de cemento portland alcanzando valores de 75.06 MPa con ceniza tipo F y 73.84 MPa con ceniza tipo C. Para la prueba de permeabilidad al ión cloruro el valor más bajo de penetración con 131 Coulombios fue observada en concretos con un 34% de ceniza volante tipo F y de 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, esto fue observado en concretos con un 34% de ceniza tipo F a los 90 días asociado a la reacción puzolánica.

Portillo et al 2012 [36] sugieren la necesaria activación de la ceniza volante para ser utilizada con NaOH y KOH el cual genera un geopolímero que podría ser utilizado como nuevo material cementante.

Rojas 2012 [37] evaluó el efecto de la densificación de la matriz cementante mediante el empleo de una ceniza volante en el proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por efecto de la corrosión del acero de refuerzo. Reporta que al sustituir cemento portland por ceniza volante, las propiedades de los concretos disminuyen ligeramente, sin embargo, las propiedades físicas mejoran. En el caso de la porosidad, el uso de la ceniza volante provoca una disminución, así mismo se logra incrementar la resistencia a la penetración de los iones cloro. Debido a la densificación de la matriz cementante se requirió más tiempo para activar el acero de refuerzo y disminuyó la rapidez de la degradación del acero (velocidad de corrosión), lo cual también se debe al cambio en la composición química de la solución de poro que reduce la difusión de agentes agresivos y limita la disponibilidad de oxígeno. Aunque el efecto de la CV en relación con la velocidad de corrosión se observa con periodos de curado largos.

Huang et al., 2013 [38] estudiaron la viabilidad de producir un concreto con cenizas volantes que cuente con una resistencia moderada utilizando un volumen alto de

ceniza volante hasta el 80% de clase F como remplazo de cemento. Reportan que el contenido de aire del concreto con cenizas volantes aumenta a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por cenizas volantes. Sin embargo, el peso unitario disminuyó con el aumento del contenido de cenizas volantes. En cuanto al tiempo de fraguado del concreto con cenizas volantes aumentó junto con el contenido de cenizas volantes. Finalmente, la resistencia a la compresión del concreto de control (sin cenizas volantes) fue superior a la de los concretos con ceniza volante, aunque con el paso del tiempo se observó ganancia de resistencia significativa.

Filho et al., 2013 [39] midieron la influencia de las cenizas volantes en concreto usando la prueba de migración de iones cloruros y porosidad en mezclas con contenidos del 50% de ceniza volante y 40% de ceniza volante más 20% de cal hidratada. Las pruebas arrojaron que la utilización de ceniza volante redujo la corriente que pasa a través del concreto, mientras que la que tenía cal hidratada no tuvo ningún efecto en el resultado. Los resultados de resistividad eléctrica indicaron que la mezcla con ceniza volante fue mejor en comparación con las otras mezclas. Concluyen que la ceniza volante mejora las condiciones de durabilidad del concreto.

Argiz 2013, [40] describen que la ceniza de carboneras tiene un contenido de CaO superior en la ceniza volante (5,0%) que favorecer en la reacción puzolánica de la sílice de la ceniza con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado en la hidratación del cemento portland común. Por otro lado, la reducida pérdida por calcinación de la ceniza volante de Carboneras (3,6%) tiene influencia en la propiedad de durabilidad, es decir, una buena resistencia en ciclos de hielo y deshielo, Como aumenta la superficie específica aumenta la actividad puzolana además de atribuir un cierto efecto de relleno. Al aumentar el porcentaje de sustitución del material cementicio disminuye la porosidad capilar, la porosidad disminuye con la edad de curado en forma general. La resistencia no se ve reflejada en instancia con la sustitución de CV ya que se tiene que esperar que esta reaccione con los silicatos cálcicos para primeramente formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Los resultados indicaron que ambas se comportaron de forma similar, aunque en la resistencia de la ceniza de fondo en ligeramente superior.

Madhavi et al., 2014 [41] 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 del 40% la resistencia a la compresión incrementa a los 28 días y con contenido mayor al 40% el aumento de la resistencia es gradual.

Supit, Shaikh, and Sarker 2014 [42] se centraron en investigar en morteros el desempeño de cenizas volantes ultrafinas mezcladas con cenizas volantes naturales (HVFA + UFFA) basados en el desarrollo de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Las cenizas volantes ultrafinas tuvieron un efecto más pronunciado

sobre la resistencia a la compresión, especialmente a edades tempranas, los morteros con ceniza ultrafina aumentaron la resistencia en un rango de 8% al 23%, el hallazgo implica que el desarrollo de la resistencia de los morteros es en gran parte determinado por el uso de las cenizas volantes ultrafinas que en lugar de las cenizas volantes F que son más gruesas. La mezcla más adecuada a las proporciones naturales debe ser consideradas para hacer la mezcla más eficaz, la adición de 8% de UFFA acelero la reacción puzolánica y aumento la resistencia a la compresión a los 7 días de los morteros HVFA con contenido de 40%, 50%, 60% y 70% entre 26% y 63%. A lo 28 días. Por lo tanto, cemento mezclado que contenga UFFA y clase F Las cenizas volantes en los morteros HVFA ofrecen un gran potencial para su uso en construcción donde tanto a corto como a largo plazo se consideran la resistencia.

Nikhil 2014 [43] estudió el uso de la ceniza volante tipo F en alto volumen en pavimentos rígidos para el desarrollo sostenible. El porcentaje de sustitución fue del 50% de cemento por ceniza volante. Los resultados arrojaron que la ceniza volante mejora la trabajabilidad en términos de asentamiento y factor de compactación. La resistencia a flexión aumento en un 6.27% a los 90 días de curado en comparación con el concreto controlado a los 28 días de curado. En cuanto la resistencia a la compresión la mezcla con ceniza volante iguala a la mezcla control a los 28 días, por lo tanto, HVFA pueden utilizarse solo para la construcción de nuevos pavimentos y no para la superposición, esto debido a la mayor resistencia a la flexión. Los pavimentos de alto volumen de ceniza volante son más económicos, particularmente beneficioso cuando el aumento de la resistencia temprana no sea criterio para la construcción del pavimento.

P.R. Wankhede, 2014 [44] notaron que concreto con 10% y 20% de reemplazo de cemento con cenizas volantes muestra una buena resistencia a la compresión durante 28 días respecto al concreto normal con una relación de 0.35 a/c, pero en el caso del 30% de reemplazo de cemento con cenizas volantes, la resistencia a la compresión final del concreto disminuye.

Rendón et al 2015 [45] reportan que la ceniza volante tipo F de origen mexicano pueden impulsarse como materia prima en los cementos alcalinos debido a su capacidad de activación.

Galvez et al., 2015 [46] sugieren que un menor tamaño de partícula favorece el porcentaje de porosidad en morteros (<45 μm), lo que genera mayor área superficial que se ve reflejado en las reacciones producidas y un menor porcentaje de porosidad y material anhidro.

Canul et al., 2015 [47] estudiaron ceniza volante proveniente de la termoeléctrica Nava Coahuila México sin ningún tipo de modificación, en mezclas de concreto. Concluyen que no se presentó actividad puzolánica, no hubo incremento en la resistencia mecánica, por lo que la inclusión podría usarse como un agregado fino inerte.

Mendoza et al., 2016 [48] evaluaron morteros con un 20% de sustitución con ceniza volante observando un comportamiento positivo frente al ataque de CO₂ y con menor probabilidad de corrosión 10% a 145 días, además de valores de permeabilidad baja.

Saha K. 2017 [48] 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. 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 incrementó a 57.4 MPa y a los 360 días alcanzó una resistencia de 62.5 MPa. Con el incremento de adición de la 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 resultando 39.2 MPa (10%), 33.8 MPa (20%) 29.8 (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 6 meses de curado el intervalo de poros permeables fue: 6.6 (0%), 6.5 (10%), 5.8 (20%), 5.2 (30%) y 5.1 (40%) respectivamente. La permeabilidad se redujo conforme aumentó la cantidad de ceniza volante.

Jing Yu et al. 2018 [50] exploraron la posibilidad de utilizar porcentajes del 80% de cenizas volantes como material aglutinante. Reportan que la sustitución de un alto contenido de cemento por cenizas volantes puede reducir significativamente el impacto ambiental y el costo del material, en comparación con el concreto comercial, el concreto verde muestra una reducción del 70% de las emisiones de CO₂ una reducción de más del 60% en energía y una reducción aproximadamente del 35% del costo del material.

Samuel 2018, [51] mencionan que al sustituir el cemento con la ceniza volante mejora la trabajabilidad, durabilidad y reduce el costo en su elaboración. Finalmente, el hecho de adicionarle ceniza volante al concreto implica una reducción de la porosidad dada la finura de este, lo que no implica aumento de la resistencia.

Mariela et al., 2019 [52] mencionan que mezclas de concreto con contenido de ceniza volante activada (química y mecánicamente) mejoran propiedades de calidad, resistividad eléctrica y permeabilidad respecto a mezclas sin contenidos de ceniza volante.

H. Alghazali et al 2019 [53] investigaron la durabilidad y la eficiencia del uso de la ceniza volante hasta 70% bajo diferentes condiciones de curado acelerado para uso en estructuras de concreto prefabricadas. Reportan que con el curado acelerado es capaz de alcanzar altos valores de resistencia a edades tempranas, muy buenas propiedades mecánicas y de durabilidad, lo que permitiría ahorrar energía y tiempo en las plantas de piezas prefabricadas. A edades tempranas en mezclas con 70% de sustitución del cemento y curado a temperaturas de 60°C y 70°C se obtuvieron buenos valores de resistencia, sin embargo, a edades posteriores los valores de resistencia fueron menores que la que se puede lograr con una temperatura de

curado de 50°C. El incremento en la temperatura de curado, favorece las reacciones de hidratación y la rápida formación de hidratos de silicio cálcico (gel C-S-H). El nivel de penetración de cloruro en todas las mezclas fue un nivel bajo de penetración y una velocidad de pulso clasificada como buena.

Kr. Pati et al., 2020 [54] realizaron un estudio para evaluar la viabilidad de la aplicación de la ceniza volante tipo F como sustituto del agregado fino en diferentes porcentajes (0% a 40%). Los resultados indican que existe una mejora significativa en las propiedades de resistencia y durabilidad cuando el agregado es reemplazado hasta en un 40%. Respecto a la absorción de agua las muestras con sustitución del 20% de agregado fino por ceniza volante mostraron una mejora del 19% respecto a la muestra control. Mencionan que es viable la utilización de ceniza volante como sustituto parcial del agregado fino y que es un material amigable con el medio ambiente ya que ayuda a disminuir la demanda de recursos minerales naturales.

2. Metodología experimental

2.1 Diseños de mezcla

La tabla 2.1 presenta las características de los materiales de partida.

Tabla 2.1 Características de los materiales de partida

Material	Tamaño	Clasificación	Origen	Densidad (g/ml)	Absorción (%)
Cemento	NA	CPC 40 R	Holcim	3.10	NA
Grava caliza ¾ "	20 mm	Caliza	NA	2.66	1.10
Arena andesita	0-5 mm	Andesita	NA	2.42	3.11
Arena caliza	0-5 mm	Caliza	NA	2.69	2.57

La tabla 2.2 presenta los diseños de mezcla fabricados.

Tabla 2.2 Diseño de mezclas

Diseño (Kg/cm ²)	250		350		450	
Grava ¾ " (Kg/m ³)	22.43	22.43	23.05	23.05	22	22
Arena andesita (Kg/m ³)	15.22	15.22	13.32	13.32	10.32	10.32
Arena caliza (Kg/m ³)	9.63	9.63	8.41	8.41	9.86	9.86
Agua (Kg/m ³)	5.30	5.30	5.58	5.58	5.19	5.19

Cemento (Kg/m3)	6.75	4.71	9.33	6.53	13.45	9.41
Ceniza volante (Kg/m3)	0	2.02	0	2.80	0	4.03

2.2 Fabricación de mezclas

Se fabricó un total de seis mezclas, obteniendo 36 muestras cilíndricas de 10*20 cm para los ensayos de durabilidad y 48 cubos de 10*10*10 cm para pruebas de resistencia a la compresión, detalladas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Mezclas de concreto fabricadas

Mezcla	Denominación	Número de cilindros	Número de cubos
BCO 250 Kg/cm2	MI	6	8
30% CV 250 Kg/cm2	MII	6	8
BCO 350 Kg/cm2	MIV	6	8
30% CV 350 Kg/cm2	MV	6	8
BCO 450 Kg/cm2	MVII	6	8
30% CV 450 Kg/cm2	MVIII	6	8
Total de muestras:		36	48

Posterior a 24 horas de la fabricación de las mezclas, fueron desmoldadas y mantenidas en el cuarto de curado por 7 días, edad en la que se inició el monitoreo de: Resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad rápida al ion cloruro. Cabe mencionar que las muestras se mantuvieron de manera permanente sumergidas en agua de la llave.

2.3 Ensayos de durabilidad

Los ensayos para la caracterización de las muestras de concreto se describen a continuación:

2.3.1 Resistividad Eléctrica (ρ)

Se realizó la prueba de resistencia eléctrica por medio del método directo utilizando un resistómetro marca Nilsson (figura 2.1), considerando el procedimiento y criterios de evaluación de la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016 [55] (tabla 2.4) se obtuvo la resistividad real. Para obtener el valor de resistividad eléctrica se utilizó la fórmula 2.1:

$$\rho = R (A / L); \text{K}\Omega - \text{cm} \qquad \text{Fórmula 2.1}$$

donde:

ρ = Resistividad eléctrica en $\text{K}\Omega - \text{cm}$

R = Resistencia eléctrica en $\text{k}\Omega$

A = Área en cm^2

L = Longitud en cm

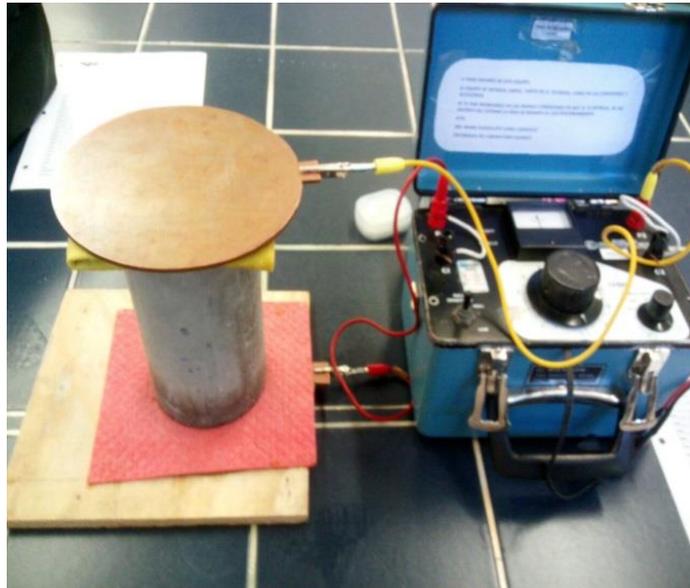


Figura 2.1 Ensayo de resistividad eléctrica de muestras cilíndricas.

Tabla 2.4 Criterios de evaluación para ensayo de resistividad eléctrica [55]

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100 – 200 kΩ·cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 a 100 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

2.3.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La prueba de Velocidad de pulso ultrasónico se realizó de acuerdo a lo descrito en el manual de la Red DURAR [56], se utilizó el equipo UPV E48 y el método de transmisión directa, se conectaron los cables al receptor y transmisor, los transductores se colocaron en las caras opuestas del espécimen (cilindro) aplicando un poco de gel en ambas caras (ver Figura 2.2). Posterior a esto se encendió el equipo y se registró cada medición de μs registrada, para posteriormente calcular la velocidad con la fórmula 2.2. Los criterios de evaluación se siguieron acorde al manual de la red Durar [56] (tabla 2.5).

$$V = d/t; \text{ m/s}$$

Fórmula 2.2

donde:

V = velocidad de pulso ultrasónico en m

d = distancia en m

t = tiempo en s



Figura 2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Tabla 2.5 Criterios de evaluación para el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) [56].

Velocidad de Propagación (m/s)	Calidad del concreto
< 2000	Deficiente
2001 a 3000	Normal
3001 a 4000	Alta
> 4000	Durable

2.3.4 Permeabilidad rápida al ion cloruro

El ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro se basó en la norma ASTM C-1202 [57], la cual mide la profundidad de penetración de iones cloruro después de haber aplicado un potencial eléctrico al espécimen para determinar el coeficiente de migración de cloruros, la cual representa los culombios (C) que pasaron a través del espécimen. Los criterios de durabilidad que se presentan en la tabla 2.6. La figura 2.3 muestra la preparación de las muestras y evaluación utilizando el equipo PROVE it.



Figura 2.3 Ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro

Tabla 2.6 Criterios de evaluación para el ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro [57].

Carga transitada (Coulomb)	Penetrabilidad de ion cloruro
>4000	Alta
2,000 a 4,000	Moderada
1,000 a 2,000	Baja
100 a 1,000	Muy Baja
<100	Despreciable

2.3.5 Determinación de resistencia a la compresión

Los especímenes fueron ensayados de acuerdo a la norma ASTM C-39 [58].

3. Resultados y análisis

3.1 Prueba de calcinación

El porcentaje de calcinación de la ceniza volante resultó del 4%, valor que conforme la norma ASTM C618 [59], se encuentra dentro del rango (máximo 6%) establecido para ser una ceniza con uso en concretos.

3.2 Análisis granulométrico de la ceniza volante

La distribución de partícula de la ceniza volante se aprecia en la figura 3.1 y los valores promedio de diámetros en la tabla 3.1. Estos indican que la distribución de partícula oscila entre 0.1 y 300 μm , el tamaño de partícula está centrado en $\sim 20 \mu\text{m}$ y el 90% de las partículas es menor $< 100 \mu\text{m}$.

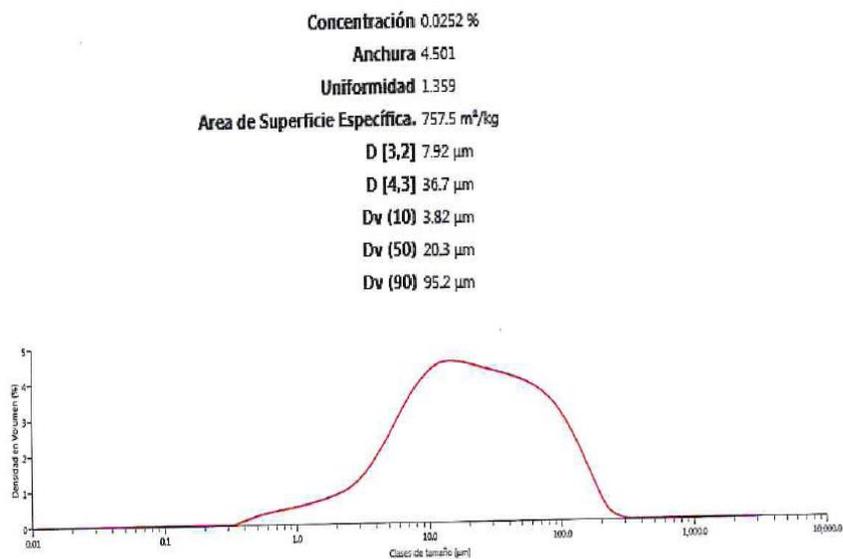


Figura 3.1 Distribución de partícula de la ceniza volante

Tabla 3.1 Valores promedio de diámetros de la ceniza volante

	Diámetro promedio en base a volumen (μm)			
	Dx (10)	Dx (50)	Dx (90)	Moda
CV	3.82	20.3	95.2	14.5

3.3 Análisis de difracción de rayos x de la ceniza volante

La composición mineralógica de la ceniza volante se aprecia en la figura 6 y porcentajes de contenido en la tabla 3.2. El difractograma indica que las principales fases presentes corresponden a óxido de silicio (67%) y de aluminio (21.6 %).

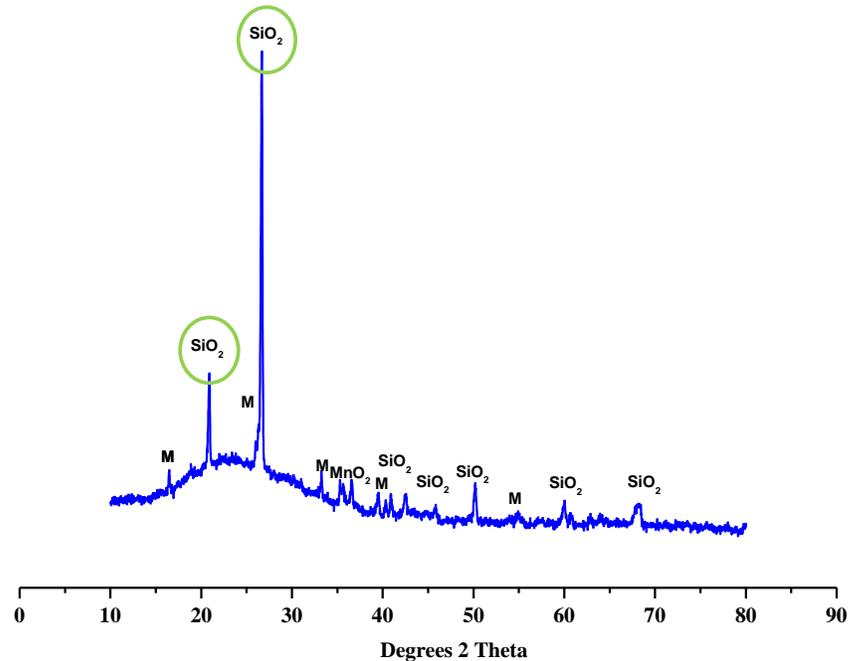


Figura 3.2 Difractograma de la ceniza volante

Tabla 3.2 Cuantificación de fases y parámetros de red de la ceniza volante

Fase	Contenido (%)	a(Å)	b(Å)	c(Å)	Alfa (deg)	Beta (deg)	Gamma (deg)	Grupo espacial
SiO ₂	67	4.9123	4.9123	5.4023	90	90	120	152 : P3121
Mullita, Al _{2.25} O _{4.875} Si _{0.15}	21.6	7.556	7.698	2.8854	90	90	90	55 : Pbam
Manganita, Mn O ₂	11.4	4.47	5.26	2.88	90	90	90	58 : Pnnm
Rwp = 1.83 % S = 1.36								

3.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) de la ceniza volante

La forma y composición cualitativa de la ceniza volante se aprecia en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5.

La forma de las partículas se apreció de forma esférica y los principales elementos identificados correspondieron al silicio y aluminio.

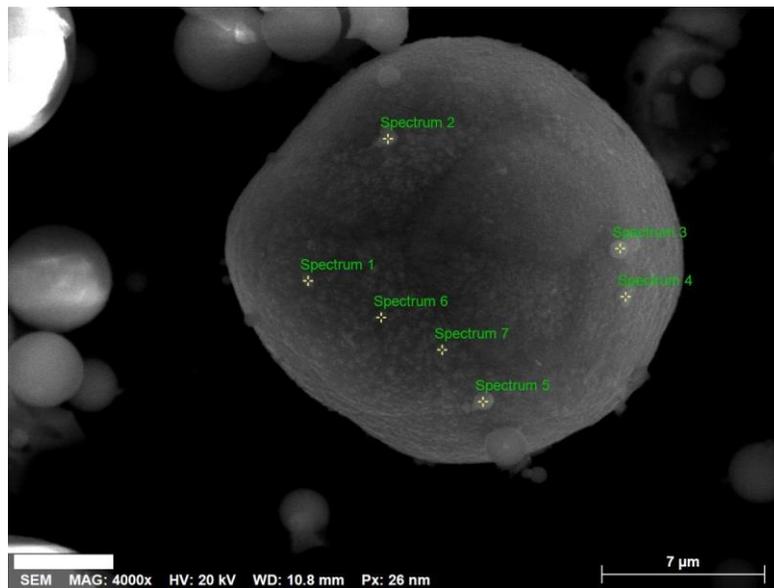


Figura 3.3 Micrografía de la ceniza volante

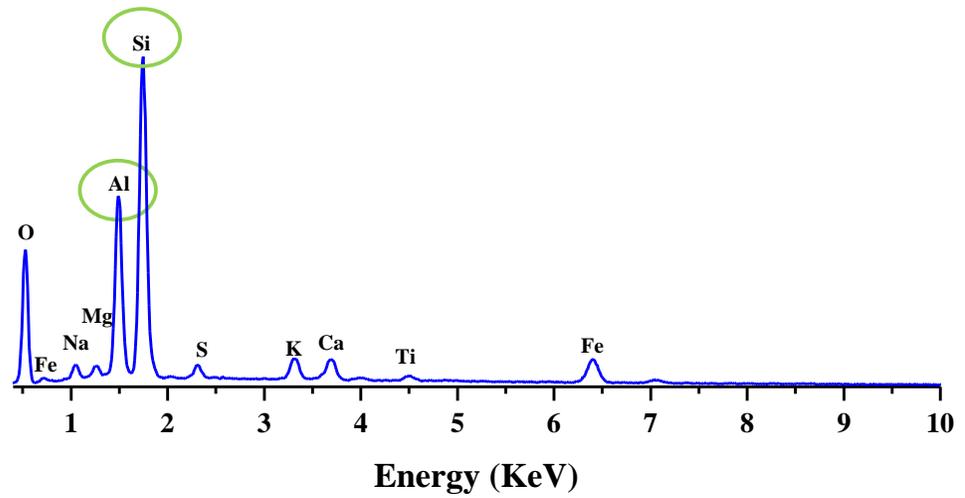


Figura 3.4 Análisis por EDS de la ceniza volante

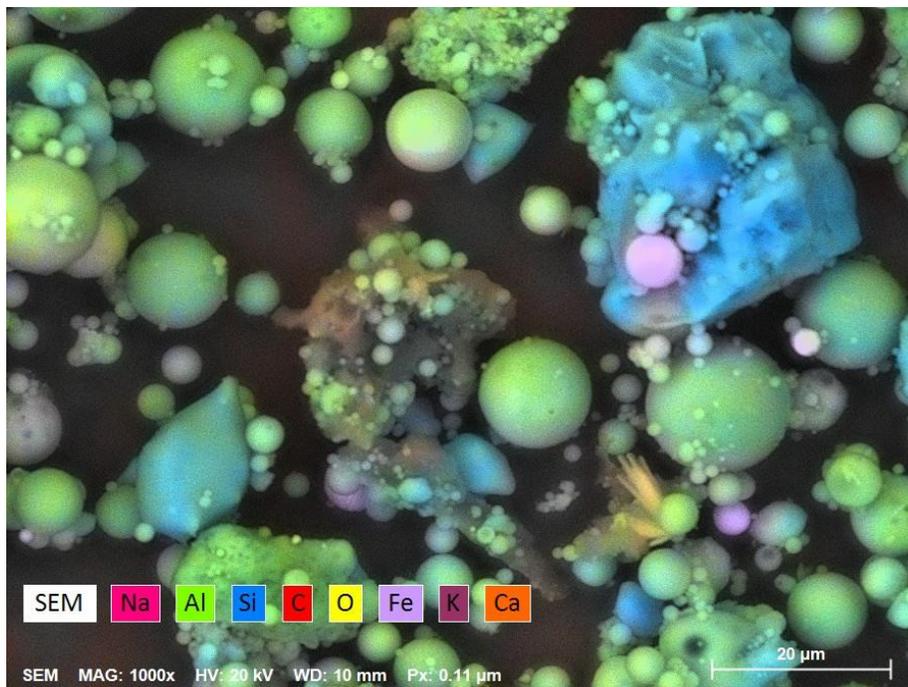
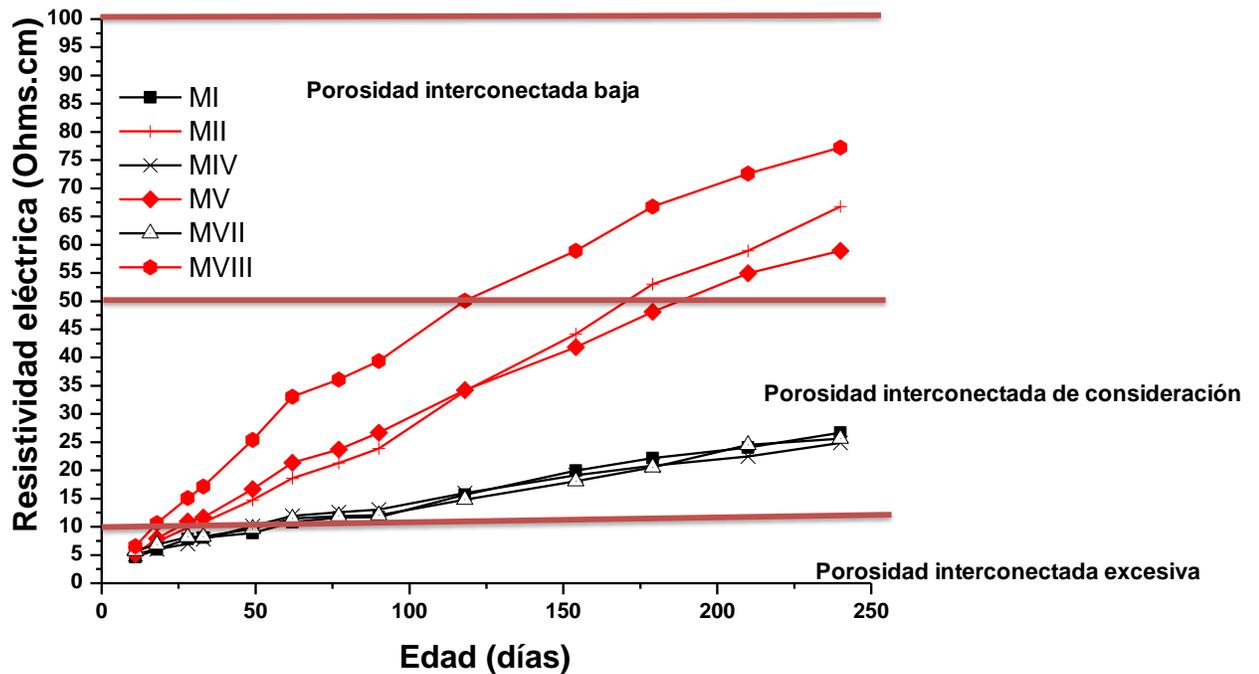


Figura 3.5 Mapeo químico obtenido por EDS de la ceniza volante

3.4 Resistividad eléctrica

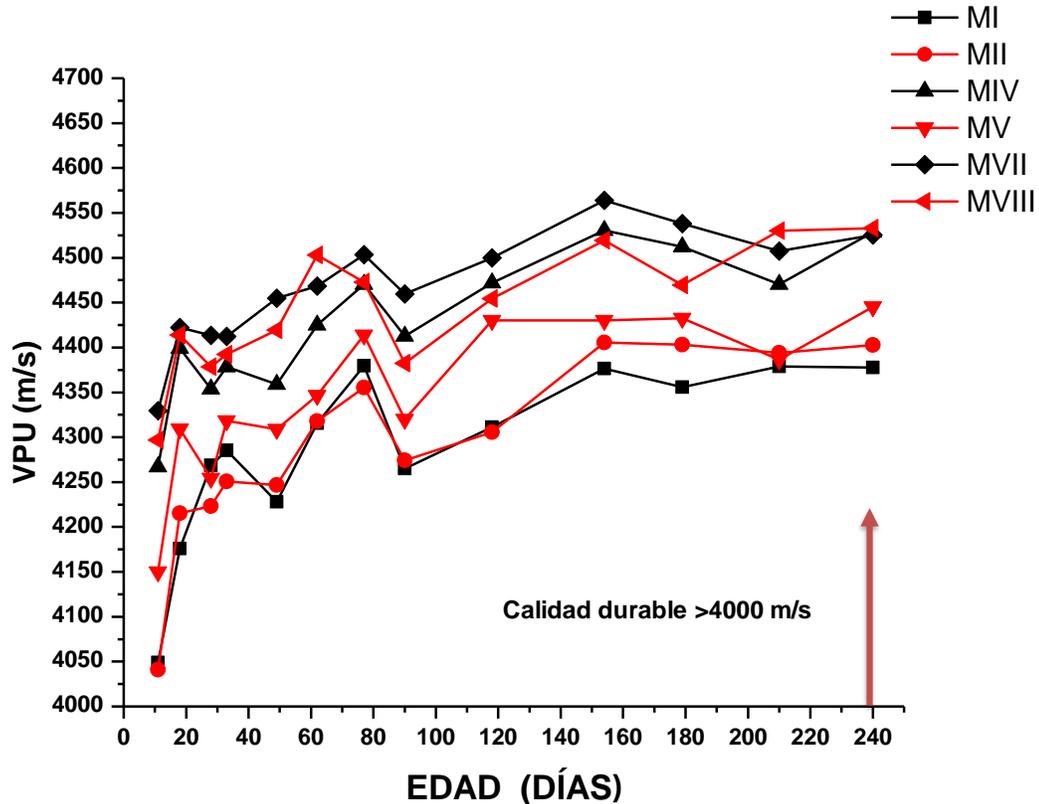
La Gráfica 3.1, muestra que los valores de las mezclas MI, MIV y MVII (sin contenidos de ceniza volante o blancos) mostraron valores entre 5 y 25 K Ω .cm, colocándose en nivel de porosidad interconectada excesiva y de consideración. Mientras las mezclas con contenidos de ceniza volante, mostraron incremento continuo de la resistividad eléctrica, variando de 5 a 77 K Ω .cm, ubicándose en nivel de porosidad interconectada baja.



Gráfica 3.1 Resultados de resistividad eléctrica

3.5 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La Gráfica 3.2 muestra los resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), donde se aprecia que en todas las edades y mezclas se alcanzó el criterio de calidad durable (>4000 m/s) considerando los criterios de evaluación del manual de la red Durar [56].

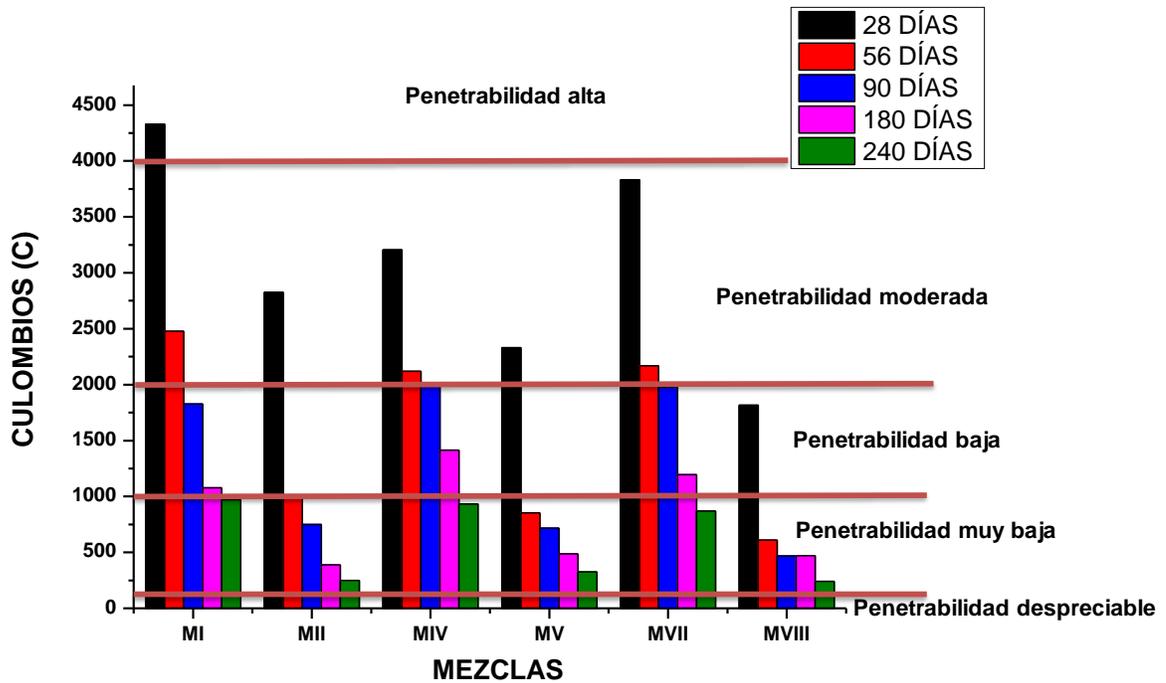


Gráfica 3.2 Velocidad de pulso ultrasónico

3.6 Permeabilidad rápida al ion cloruro

La Gráfica 3.3 presenta los resultados del ensayo de permeabilidad rápida al ion cloruro. Se observa que a 28 días el nivel de permeabilidad de las mezclas sin contenido de ceniza volante superó los 2000 C, a los 90 días el nivel resultó de penetrabilidad baja y a 240 días alcanzaron nivel de penetrabilidad muy baja. Esta tendencia se observó en los tres diseños de mezclas.

Por otro lado, en las mezclas con contenidos de ceniza volante se observó que los valores de permeabilidad variaron respecto al diseño de mezcla. Los diseños 250 y 350 kg/cm² a 28 días mostraron un nivel de penetrabilidad moderada, mientras el diseño 450 kg/cm² resultó de penetrabilidad baja. A partir de los 56 días, el nivel de permeabilidad de todas las mezclas con ceniza volante se ubicó en nivel de penetrabilidad muy baja.



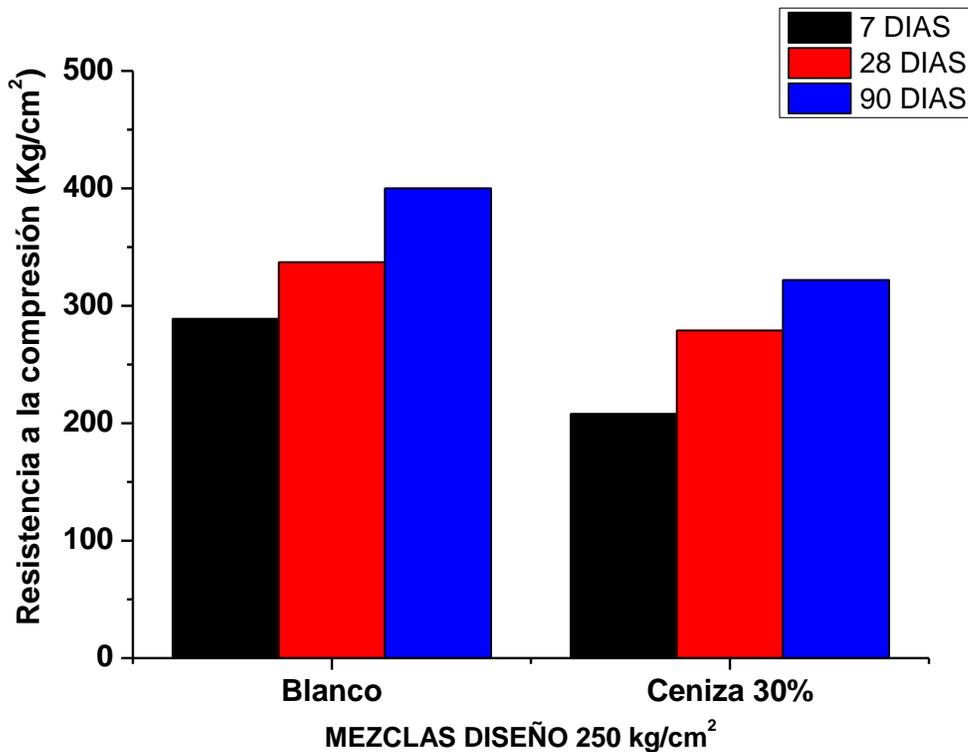
Gráfica 3.3 Permeabilidad rápida al ion cloruro

Considerando las gráficas 3.1 y 3.3, se observó que a mayor valor de resistividad eléctrica menor el nivel de permeabilidad al ión cloruro, condición más evidente en las mezclas MII, MIV y MVI respecto a MI, MIII y MV. 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 produjo el refinamiento de la estructura del poro y menor permeabilidad.

3.7 Resistencia mecánica a la compresión

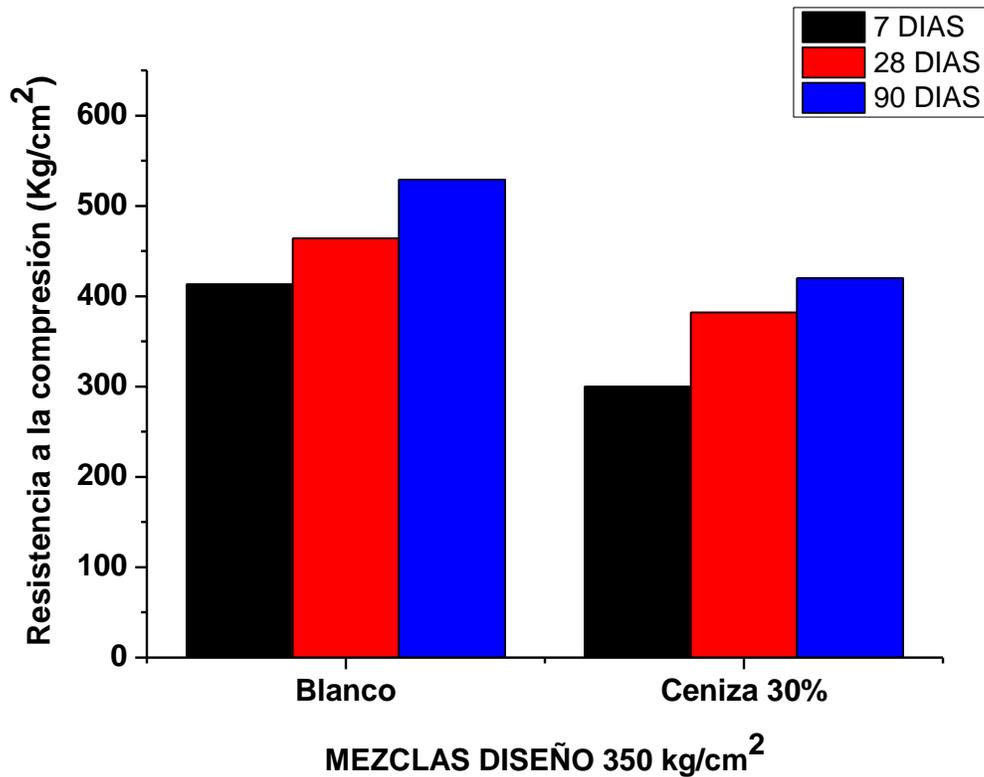
Las Gráficas 3.4, 3.5 y 3.6 muestran los resultados de resistencia mecánica a la compresión de los tres diseños de mezcla considerados.

Considerando las tres edades de ensayo de resistencia a la compresión, es notorio que la mezcla con contenido del 30% de ceniza volante mostró valores menores respecto al blanco (sin contenidos de ceniza volante), a 7 días la resistencia a la compresión fue menor un 28%, a 28 días 17% y a 90 días 19%. Aún con estas diferencias, el requerimiento de resistencia del diseño se cumplió en los dos casos.



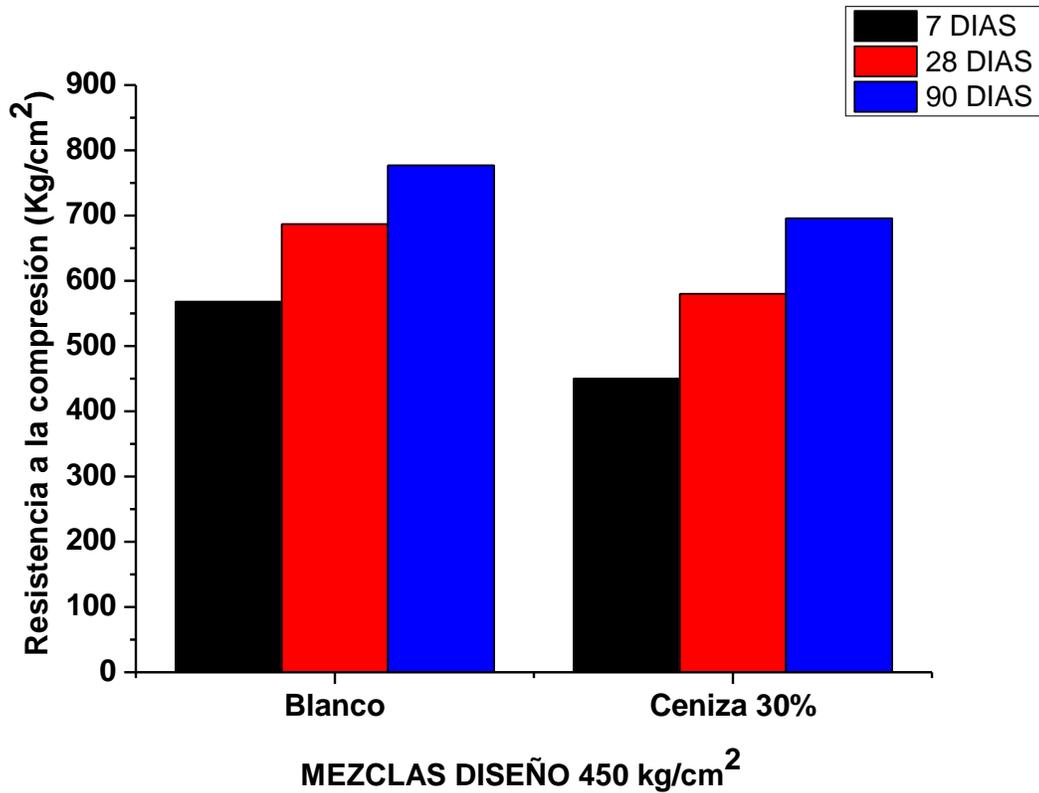
Gráfica 3.4 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 250 kg/cm²

En la gráfica 3.5 se observa que la mezcla con contenido del 30% de ceniza volante mostró valores menores respecto al blanco (sin contenidos de ceniza volante). A 7 días la resistencia a la compresión fue menor en un 27%, a 28 días 17% y a 90 días 20%. No obstante, el requerimiento de resistencia del diseño se cumplió en las dos mezclas.



Gráfica 3.5 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 350 kg/cm²

Para las mezclas de diseño 450 kg/cm², los valores de resistencia a la compresión de la mezcla con contenido del 30% de ceniza volante resultó también menor respecto al blanco (sin contenidos de ceniza volante), a 7 días la resistencia a la compresión fue menor un 20%, a 28 días 15% y a 90 días 10%, aunque la diferencia fue menor respecto a los diseños 250 y 350 kg/cm². Cabe mencionar, que el requerimiento de resistencia del diseño se cumplió en las dos mezclas. Ver gráfica 3.6.



Gráfica 3.6 Resistencia a la compresión de mezclas con diseño 450 kg/cm²

Considerando las gráficas 3.2, 3.4, 3.5,3.6, los criterios de una velocidad de pulso ultrasónico >4000 m/s y una resistencia mecánica > 45 MPa, se concluye que las mezclas con diseño 450 kg/cm² se tratan de concretos de calidad durable. En las mezclas con diseño 250 y 350 kg/cm² se observó los valores de VPU se cumplieron con la resistencia esperada para cada cada diseño. Las resistencias a la compresión fueron mayores en las mezclas MI, MIII y MV. Se dedujo que la velocidad de pulso ultrasónico no fue proporcional a la resistencia mecánica en las mezclas MII, MIV y MVI.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se concluye:

- La presencia de ceniza volante en las mezclas de concreto, favoreció el desarrollo de la resistividad eléctrica, ocasionando que el nivel de porosidad disminuyera. Las mezclas con ceniza volante alcanzaron el nivel de porosidad interconectada baja, mientras los concretos sin ceniza volante se ubicaron en porosidad interconectada de consideración.
- La calidad del concreto en las mezclas con y sin contenidos de ceniza volante resultó en todo el monitoreo de calidad durable.
- La presencia de la ceniza volante favoreció la disminución de la penetrabilidad al ion cloruro. El nivel de permeabilidad al ion cloruro en las mezclas con ceniza volante a partir de los 56 días resultó de penetrabilidad muy baja, mientras las mezclas sin contenido de ceniza volante lograron este nivel a la edad de 240 días.
- Mezclas con contenidos de sustitución del 30% de ceniza volante por cemento portland, no alcanzan resistencias a la compresión del orden alcanzado con mezclas con 100% cemento portland. Aun cuando se cumplió con el valor de resistencia de diseño, comercialmente es necesario lograr valores iguales o superiores que las mezclas con cemento portland, sugiriendo, se utilice un método de activación que favorezca la reactividad de la ceniza volante.

Bibliografía

1. Unidas N. Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. 1998;61702.
2. Schneider H and JS. La huella del carbono en la producción , distribución y consumo de bienes y servicios. 2010.
3. Arana MAC. El concreto, material fundamental para la infraestructura. 2016;24–5.
4. Debanath O, Islam M, Islam M. Use of Geopolymer Concrete as Green Construction Material-A Review. Proc Int [Internet]. 2015;26–9. Available from: [http://www.cuet.ac.bd/icmere/ICMERE_2015_Proceedings/Session-III\(B\)/ICMERE2015-PI-079.pdf](http://www.cuet.ac.bd/icmere/ICMERE_2015_Proceedings/Session-III(B)/ICMERE2015-PI-079.pdf)
5. Rendón-Belmonte M, Torres Acosta AA, Del Valle Moreno A, Pérez Quiroz JT, Lomelí González G, Martínez Madrid M. Evaluación de estructuras de concreto reforzado en México, muelles [Internet]. Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. 2013. Available from: [http://www.cuet.ac.bd/icmere/ICMERE_2015_Proceedings/Session-III\(B\)/ICMERE2015-PI-079.pdf](http://www.cuet.ac.bd/icmere/ICMERE_2015_Proceedings/Session-III(B)/ICMERE2015-PI-079.pdf)
6. Mundo BN. Cambio climatico: los gráficos animados que muestran los 15 paises que mas CO2 emitieron en los últimos 20 años. [Internet]. BBC Mundo. 2019. Available from: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-50811389>
7. SEMARNAT I. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) de Mexico quinta comunicacion nacional ante la CM nac unidas sobre cc. SEMARNAT. 2012;189–400.
8. Macinnis JJB and C. The effect of admixtures on the strength-porosity

- relationship of portland cement paste. *Cem Concr Compos.* 1971;1:3–11.
9. Montgomery DG, Hughes DC, Williams RIT. Fly ash in concrete - A microstructure study. *Cem Concr Res.* 1981;11(4):591–603.
 10. Thaulow GMI and N. Effectiveness of research on fly ash in concrete. *Cem Concr Res.* 1985;15:535–44.
 11. Ho DWS, Lewis RK. Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete. *Cem Concr Res.* 1985;15(5):793–800.
 12. Wei. Fajun MWG and DMR. The retarding effects of fly ash upon the hydration of cement pastes: The first 24 hours. *Cem Concr Res.* 1985;15:174–84.
 13. Marsh BK, Day RL, Bonner DG. Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash. *Cem Concr Res.* 1985;15(6):1027–38.
 14. Mehta PK. Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures. *Cem Concr Res.* 1985;15:669–74.
 15. Ravina D and PKM. Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash. 1986;16(c):20–30.
 16. Santiago JR. El empleo de las cenizas volantes en la fabricación de los hormigones. 1988. p. 663–76.
 17. Tamez PV. Efectos del dióxido de carbono en los morteros de cemento hidráulico con ceniza volante. UANL; 1998.
 18. Luxán MP, Sánchez de Rojas MI, Frías M. Investigations on the fly ash-calcium hydroxide reactions. *Cem Concr Res.* 1989;19(1):69–80.
 19. Malhotra VM. Durability of Concrete Incorporating High-Volume of Low-Calcium (ASTM Class F) Fly Ash. *Cem Concr Compos* [Internet]. 1990;12:271–7. Available from:
 20. Jiang and Malhotra 2000 Reduction in water demand of non-air-entrained

concrete incorporating large volumes of fly ash.

21. Poon, Lam, and Wong 2000 Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems
22. Montemor MF, Simões AMP, Salta MM. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. *Cem Concr Compos.* 2000;22(3):175–85.
23. Siddique 2003 Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete
24. Durán Herrera Alejandro RTJM. Concreto para uso estructural, económico, durable y sustentable con alto contenido de ceniza volante. In: Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. 2004.
25. Javier MEC. Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante. 2005;
26. Pedro L. Valdez, Alejandro Durán JMR y CAJ. Concretos con altos volúmenes de ceniza volante. *Bibl Digit UANL.* 2007;49–57.
27. Paniagua EV. Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante. 2007.
28. Sahmaran and Ozgur Yaman 2007 Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash
29. Silverio HM. Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Portland. *Cienc Ergo Sum.* 2008;15:306–10.
30. Bas OIM. La Influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón. Vol. 23, Madrid. 2008.
31. Medina Adriana, Gamero Prócoro, Querol Xavier, Moreno Natalia, De león Beatriz, Almanza Manuel, Vargas Gregorio, Izquierdo María FO. Fly ash from a Mexican mineralcoal I: Mineralogical and chemical characterization. J

- Hazard Mater. 2010;181:82–90.
32. Caballero Olague Cecilia, Wenglas Lara Gilberto BAF. Adiciones minerales como atenuantes de la reacción álcali sílice en estructuras de concreto hidráulico. *Tecnociencia Chihuahua*. 2011;49–56.
33. Sánchez OD. Evaluación técnica-experimental de la deflexión de vigas de concreto reforzado con altos consumos de ceniza volante. 2011.
34. Pati SL, Kale JN, Suman S. Research Paper FLY ASH CONCRETE : A TECHNICAL ANALYSIS FOR. *Int J Adv Eng Res Stud*. 2012;II:4–5.
35. Uysal M, Akyuncu V. Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. *Constr Build Mater* [Internet]. 2012;34:170–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.075>
36. Portillo Pérez D.A., Srredondo Rea S.P., Corral Higuera R., Gómez Soberón J. M., Orozco Carmona V.M. ASJL. Caracterización de cenizas volantes activadas alcalinamente como material alternativo al cemento. *ALCONPAT*. 2012;77–84.
37. Rojas AE. Efecto del uso de ceniza volante en el proceso de agrietamiento del concreto por corrosión del acero de refuerzo. 2012.
38. Huang et al., 2013
39. Filho et al., 2013
40. Argiz C, Menéndez E, Sanjuán MA. Efecto de la adición de mezclas de ceniza volante y ceniza de fondo procedentes del carbón en la resistencia mecánica y porosidad de cementos Portland. *Mater Constr*. 2013;63(309):49–64.
41. Madhavi T. Ch., Swamy Raju L. MD. Durabilty and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete. *J Civ Eng Res*. 2014;4:7–11.
42. Supit, Shaikh, and Sarker 2014 Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar

-
43. Nikhil 2014
44. P.R. Wankhede VAF. Effect of fly ash on properties of fresh concrete. *Int J Appl Eng Res.* 2014;9(1):69–82.
45. Rendón Belmonte M, Fernández Jiménez A, Palomo Sánchez Á, Martínez Madrid M, Torres Acosta A, Pérez Quiroz JT. Desarrollo de nuevos cementos: “Cementos alcalinos y cementos híbridos.” *Publicación técnica IMT pt 444* [Internet]. 2015;1–88. Available from: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt444.pdf>
46. Gálvez-López, M.F., Rosas-Cásarez, C.A., Arredondo-Rea, S.P., Corral-Higuera R. Estudio Comparativo de la porosidad en morteros de geopolímero por las técnicas de imagen y adsorción física de gases. 2015;
47. Canul J.A, Moreno E.I MRJ. Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas de concretos hechos con agregado calizo triturado de alta absorción. *ALCONPAT.* 2015;6:235–47.
48. Mendoza-Rangel J.M, Flores-Jarquín J.M, De Los Santos E.U GP. Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial. *ALCONPAT.* 2016;6:41–51.
49. Saha AK. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustain Environ Res* [Internet]. 2018;28(1):25–31. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
50. Jing Yu et al. 2018
51. Samuel Huaquisto Cáceres GBQ. Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *J High Andean Res.* 2018;20(2):225–34.
52. Mariela Rendón Belmonte, Miguel Martínez Madrid, Rosa Verónica Martínez Pérez MAO. Concretos híbridos durables y sustentables, con contenidos de ceniza volante. *Publicación técnica IMT 559.* 2019;
-

53. Alghazali HH, Aljazaeri ZR, Myers JJ. Effect of accelerated curing regimes on high volume Fly ash mixtures in precast manufacturing plants. *Cem Concr Res* [Internet]. 2020;131(February):105913. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105913>
54. Kr. Pati P, Kr. Sahu S. Innovative utilization of fly ash in concrete tiles for sustainable construction. *Mater Today Proc* [Internet]. 2020; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.971>
55. NMX. NMX-C-514-ONNCE "Industria de la construcción - resistividad Eléctrica del concreto Hidráulico - Especificaciones y metodos de ensayo. 2016.
56. Oladis Trocolis de Rincon, Aleida Romero de Carruyo, Aleida Romero de Carruyo, Carmen Andrade PH e ID. Manual de inspección, evaluación y diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado. *Colecc textos Univ.* 2007;3:1–16.
57. ASTM Standard. ASTM C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Society for Testing and Materials. 2012 p. 1–8.
58. ASTM Standard, ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials. 2018
59. ASTM Standard. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete. 2019.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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