



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Evaluación físico-mecánica y por criterios de durabilidad de matrices cementicias con sustituciones orgánicas

Juan Fernando Mendoza Sánchez
Wilfrido Martínez Molina
Víctor Hugo Blancas Herrera
Elia Mercedes Alonso Guzman
Mauricio Arreola Sánchez
Jorge Alberto Borrego Pérez
Hugo Luis Chávez García
Noel Díaz González
Cindy Lara Gómez
Marco Antonio Mondragón Ornelas
Marco Antonio Navarrete Seras

Publicación Técnica No. 705
Sanfandila, Qro.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada conjuntamente por el Instituto Mexicano del Transporte a través del M en C Juan Fernando Mendoza Sánchez y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por el Ing. Victor Hugo Blancas Herrera, el Dr. Wilfrido Martínez Molina, la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzman, Dr. Mauricio Arreola Sánchez, Dr. Jorge Alberto Borrego Pérez, Dr. Hugo Luis Chávez García, Dr. Noel Díaz González, Mtra. Cindy Lara Gómez, Dr. Marco Antonio Mondragón Ornelas y el Dr. Marco Antonio Navarrete Seras.

Esta investigación se obtuvo del trabajo de Tesis: “Evaluación físico-mecánica y por criterios de durabilidad de matrices cementicias con sustituciones orgánicas”.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	ix
Sinopsis.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen Ejecutivo.....	xvii
Introducción.....	.1
1 Antecedentes.....	.3
2 Caracterización de los materiales.....	.9
3 Metodología.....	29
4 Resultados y discusión.....	51
Conclusiones.....	101
Bibliografía.....	105

Índice de figuras

Figura 3.1 Límites de granulometría para morteros y concreto	33
Figura 4.1 Gráfica de composición granulométrica de la arena del banco “Joyitas”.	58
Figura 4.2 Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica.....	59
Figura 4.3 Resultados de la prueba de sedimentación	59
Figura 4.4 Resultados del pH en el mortero fresco	62
Figura 4.5 Resultados de densidad a edades tardías	63
Figura 4.6 Tendencia de resultados de densidad, por su edad de prueba.....	63
Figura 4.7 Resultados de gravedad específica a edades tardías.....	64
Figura 4.8 Tendencia de la gravedad específica, por su edad de prueba	65
Figura 4.9 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cubos, a edades tardías .	66
Figura 4.10 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos, por su edad de prueba	66
Figura 4.11 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cilindros, a edades tardías	67
Figura 4.12 Tendencia de resistividad eléctrica en cilindros, por su edad de prueba	67
Figura 4.13 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en prismas, a edades tardías	68
Figura 4.14 Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba	68
Figura 4.15 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cubos, a edades tardías	70
Figura 4.16 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos, por su edad de prueba	70

Figura 4.17 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cilindros, a edades tardías.....	71
Figura 4.18 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros, por su edad de prueba	71
Figura 4.19 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en prismas, a edades tardías.....	72
Figura 4.20 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en prismas, por su edad de prueba	72
Figura 4.21 Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba	73
Figura 4.22 Tendencia de compresión simple en cubos, por su edad de prueba .	74
Figura 4.23 Resultados de resistencia a la flexión en prismas, a edades tardías .	75
Figura 4.24 Tendencia de resistencia a la flexión en prismas, por su edad de prueba	76
Figura 4.25 Resultados de resistencia a tensión directa en briquetas, a edades tardías	77
Figura 4.26 Tendencia de resistencia a tensión directa en briquetas, por su edad de prueba	77
Figura 4.27 Resultados de resistencia a tensión indirecta en cilindros, a edades tardías	78
Figura 4.28 Tendencia de resistencia a tensión indirecta en cilindros, por su edad de prueba	79
Figura 4.29 Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a la edad de 120 y 180 días.....	80
Figura 4.30 Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.....	81
Figura 4.31 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.....	82
Figura 4.32 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.....	82
Figura 4.33 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.....	83

Figura 4.34 Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.....	83
Figura 4.35 Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.....	84
Figura 4.36 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.....	85
Figura 4.37 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.....	85
Figura 4.38 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.....	86
Figura 4.39 Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.....	86
Figura 4.40 Resultados de Resistividad Eléctrica (RE) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados	88
Figura 4.41 Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados	89
Figura 4.42 Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 25 años	90
Figura 4.43 Prueba de absorción capilar para un espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%	92
Figura 4.44 Resultados de absorción capilar (s) a la edad de 90 y 180 días	94
Figura 4.45 Resultados de la resistencia a la penetración del agua (m) a la edad de 90 y 180 días.....	95
Figura 4.46 Resultados de absorción capilar (k) a la edad de 90 y 180 días.....	96
Figura 4.47 Resultados de Porosidad efectiva (ϵ_e) a la edad de 90 y 180 días....	96

Índice de tablas

Tabla 2.1 Clasificación de los cementos en México	10
Tabla 2.2 Comparativa del cemento en función de su desempeño	10
Tabla 2.3 Composición química del Clínker (% en masa)	11
Tabla 2.4 Componentes de los cementos en México	14
Tabla 2.5 Requisitos de los componentes principales	15
Tabla 2.6 Especificaciones físicas	15
Tabla 2.7 Especificaciones químicas	15
Tabla 2.8 Especificaciones del cemento con características especiales	16
Tabla 2.9 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas	21
Tabla 2.10 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua	22
Tabla 3.1 Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos	31
Tabla 3.2 Dosificación del aditivo en polvo para una mezcla de concreto	36
Tabla 3.3 Dosificación de las mezclas en estudio	37
Tabla 3.4 Número de especímenes requeridos por cada tipo de mortero en estudio	40
Tabla 3.4 Normas de referencia para los ensayos de durabilidad	46
Tabla 4.1 Resultado de la densidad del cemento	53
Tabla 4.2 Resultados de la consistencia normal del material cementante	54
Tabla 4.3 Resultados del tiempo de fraguado	54
Tabla 4.4 Resultados del contenido total de Humedad actual evaporado por secado	55
Tabla 4.5 Resultados del porcentaje de humedad de absorción en la arena	55

Tabla 4.6 Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la arena	55
Tabla 4.7 Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la arena	56
Tabla 4.8 Granulometría y módulo de finura de la muestra 1	56
Tabla 4.9 Granulometría y módulo de finura de la muestra 2	56
Tabla 4.10 Granulometría y módulo de finura de la muestra 3	57
Tabla 4.11 Granulometría y módulo de finura promedio	57
Tabla 4.12 Resultados de la prueba de colorimetría	58
Tabla 4.13 Porcentaje de material fino que contiene la arena	60
Tabla 4.14 Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena	60
Tabla 4.15 Resultados de la densidad de la arena	61
Tabla 4.16 Resultados de equivalente de arena	61
Tabla 4.17 Resultados de la prueba de fluidez para las distintas mezclas en estudio	62
Tabla 4.18 Comparación de resultados de resistencias mecánicas	79
Tabla 4.19 Resultados cualitativos de la resistencia a la tensión por adherencia	80
Tabla 4.20 Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días	87
Tabla 4.21 Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando RE=0	89
Tabla 4.22 Serie de datos para el primer espécimen cubico de la mezcla FN 0.5%	91
Tabla 4.23 Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días	97
Tabla 4.24 Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco	97
Tabla 4.25 Resumen de resultados de pruebas no destructivas	98
Tabla 4.26 Resumen de resultados de pruebas no destructivas	99
Tabla 4.27 Resumen de resultados de pruebas por durabilidad	100

Sinopsis

En la presente investigación, se evaluó el comportamiento del concreto con la adición de Fibra de Nopal (FN) y el almidón o fécula de maíz (MZ) como sustitutos de la masa total de Cemento Portland en la elaboración de morteros, con el objetivo de mejorar las propiedades físico-mecánicas, reducir la cantidad de cemento empleado y prevenir la acción de mecanismos que deterioran al concreto en ambientes extremos en su mayoría.

Durante el proceso de experimentación se diseñaron 3 mezclas de mortero con sustituciones orgánicas de acuerdo a la normativa, con una relación agua-cemento igual a 0.68 e incorporando un aditivo superplastificante para alcanzar de manera óptima la trabajabilidad de la mezcla, siendo un mortero control (cemento-arena-agua); y dos mezclas con sustitución parcial de fibra de nopal (FN) 0.5% y 1.5% respectivamente, y una mezcla de 2% de almidón con 0.5% de fibra de nopal (MZ 2% - FN 0.5%).

Los resultados permitieron demostrar que las sustituciones orgánicas propuestas permiten obtener materiales con un comportamiento físico-mecánico y de durabilidad aceptable, los cuales superan las características de un mortero convencional, y con ello disminuir el consumo y empleo de cemento Portland, lo que además llevaría a reducir las emisiones a la atmósfera debido a la reducción de su consumo.

Abstract

In this research, the behavior of concrete was evaluated with the addition of Nopal Fiber (FN) and Corn Starch (MZ) as substitutes for the total mass of Portland Cement in the elaboration of mortars, with the objective of improving the physical-mechanical properties, reducing the amount of cement used and preventing the action of mechanisms that deteriorate concrete in extreme environments in the majority of cases.

During the experimental process, 3 mortar mixtures were designed with organic substitutions according to the standards, with a water-cement ratio equal to 0.68 and incorporating a superplasticizing additive to optimally achieve the workability of the mixture, being a control mortar (cement-sand-water); and two mixtures with partial substitution of nopal fiber (FN) 0.5% and 1.5% respectively, and a mixture of 2% corn starch with 0.5% of nopal fiber (MZ 2% - FN 0.5%).

The results allowed demonstrating that the proposed organic substitutions allow obtaining materials with an acceptable physical-mechanical behavior and durability, which exceed the characteristics of a conventional mortar, and thus reduce the consumption and use of Portland cement, which would also lead to a reduction in atmospheric emissions due to the reduction of its consumption.

Resumen ejecutivo

En los últimos años se ha buscado mejorar las características físicas, químicas y mecánicas de los concretos y los morteros, a través de incorporación de aditivos industriales, pero también se ha buscado utilizar alternativas orgánicas que sustituyan la cantidad de cemento de las mezclas, esto como una vía sustentable para reducir el consumo de cemento en la industria de la construcción, pero también el uso de materiales disponibles localmente que mejoren otras propiedades del concreto y del mortero.

En la revisión bibliográfica histórica y del estado del arte sobre el uso de aditivos en concreto o morteros en la construcción, se encontró que los constructores históricamente han hecho uso de los materiales locales de la región para incorporar en las mezclas, con el objeto de obtener una mejora en ciertas propiedades, como su trabajabilidad, su retardamiento de fraguado, su impermeabilidad, su durabilidad, etc. Se identificó el uso de materiales orgánicos como aditivos en las mezclas, tales como aceites, fibras naturales, sangre, etc. El estado del arte nos mostró que la fibra del nopal ha sido analizada y probada en ciertos porcentajes y condiciones, así como los almidones, sin embargo, se evaluó que existía la posibilidad de evaluar combinaciones y otras proporciones

En la presente investigación, se evaluó el comportamiento del concreto con la adición de fibra de cactus *Opuntia* o fibra de nopal (FN) y el almidón (fécula de maíz, MZ) como sustitutos de la masa total de Cemento Portland en la elaboración de morteros, con el objetivo de mejorar las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad, reducir la cantidad de cemento empleado y prevenir la acción de mecanismos que deterioran al concreto en ambientes extremos en su mayoría.

Para ello se diseñaron 3 mezclas de mortero, de acuerdo a la normativa aplicable, con una relación agua-cemento igual a 0.68 e incorporando un aditivo superplastificante para alcanzar de manera óptima la trabajabilidad de la mezcla, siendo un mortero control (cemento-arena-agua); y dos mezclas con sustitución parcial de fibra de nopal (FN) 0.5% y 1.5% respectivamente, y una mezcla de 2% de almidón con 0.5% de fibra de nopal (MZ 2% - FN 0.5%).

Para evaluar las matrices cementicias con sustituciones orgánicas se requiere conocer y caracterizar los materiales que se utilizarán en la investigación, de tal manera que se identificaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas, de los cementos, los agregados, etc.

El proceso metodológico propuesto para evaluar el comportamiento de las mezclas de estudio, implica analizar la calidad de los materiales (propiedades físico-mecánicas) a través de las diversas normativas vigentes, el control de la calidad del

mortero fresco a través de los estándares normativos que le aplican, y el control de calidad de los ensayos en el mortero endurecido. Esto último implica la realización de pruebas no destructivas, pruebas destructivas y pruebas de durabilidad.

Para la identificación en esta publicación cada una de estas mezclas evaluadas fueron identificadas como sigue:

- **T10** = Mortero testigo o control con 100% de cemento.
- **FN 0.5%** = 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.
- **FN 1.5%** = 1.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.
- **MZ 2%-FN 0.5%** = 2% de Almidón o fécula de maíz y 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.

Los resultados de la evaluación realizada a los materiales, al mortero fresco y al mortero endurecido, se resumen a continuación:

- El empleo de Fibra de Nopal y de Fécula de Maíz (Almidón) en la mezcla de mortero, le infieren una densidad aceptable por lo que se puede decir que dichos materiales densifican y estabilizan a la matriz cementicia.
- La propiedad cementante más importante observada en las mezclas de mortero con las distintas sustituciones de material orgánico fue el tiempo de fraguado, las cuales presentaron un tiempo de fraguado final superior a la mezcla testigo y a los límites establecidos por la normativa.
- Con relación a las pruebas no destructivas o parámetros físicos relacionados con la durabilidad, se obtuvo una resistividad eléctrica más alta en especímenes de FN 1.5%, clasificando los resultados como un mortero con una velocidad de corrosión baja, obteniendo un valor de 59.9 kΩ-cm; superando considerablemente a las otras dos mezclas con sustitución (FN 0.5% con RE=35.32 kΩ-cm y MZ 2%-FN 0.5% con RE = 29.12 kΩ-cm) y al mortero testigo (T10 con RE = 21.75 kΩ-cm).
- Sobre las pruebas destructivas o ensayos de resistencia mecánica, en compresión simple la MZ 2%-FN 0.5% arrojó resultados satisfactorios superando al T10 con resistencia de 41.63 MPa a los 150 días, pero teniendo un comportamiento similar al mortero testigo (T10) y a las demás mezclas con fibra de nopal.
- En cuanto a la resistencia a la tensión por flexión el mortero testigo (T10) es quien presenta un MR = 7.23 MPa, mayor que los morteros con porcentaje de sustitución de fibra de nopal y almidón a los 300 días. Sin embargo, el resto de las mezclas con sustituciones orgánicas cumplieron con las especificaciones normativas mínimas.
- El comportamiento de la MZ 2%-FN 0.5% en el ensayo de tensión directa, es similar pero menor al mortero T10, alcanzando valores mayores a los 180 días de hasta 3.33 MPa.
- Con respecto a los ensayos de durabilidad se logró obtener una clasificación de velocidad de corrosión baja para las mezclas con sustitución de fibra de nopal y de una alta calidad en todas las mezclas expuestas al ataque por

sulfatos.

- La mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5% presentó un riesgo bajo de penetración de cloruros (1538 Coulombs), el cual es un mejor resultado que el obtenido en las mezclas con fibra de nopal y de la mezcla testigo.
- Estimando la profundidad de carbonatación en los distintos morteros a una edad de 25 años, se tiene que la FN 1.5% tiene el menor valor de profundidad con 19.69 mm solo por debajo de la mezcla T10 (25.92 mm).
- En los resultados de absorción capilar se concluye que todas las mezclas tienen una baja porosidad efectiva, siendo la de menor valor la FN 1.5% (0.97%) y con una absorción capilar apta para ambientes no tan severos.

La sustitución de fibra de nopal y almidón densificó notablemente a la matriz cementicia, lo que dio como resultado el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas, así como las de durabilidad prevalecientes en morteros convencionales.

De manera favorable la FN 1.5% presenta mejores resultados de durabilidad, así como un mejor comportamiento en las pruebas físicas, que de igual manera el mortero de FN 0.5% destaca por sus valores significativos en las pruebas no destructivas.

En las pruebas mecánicas o destructivas la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% es la que presenta mayores valores de resistencia, considerándose como un mortero de resistencia aceptable, pero sin dejar a un lado las sustituciones de fibra de nopal que en comparación con las de un mortero convencional no presenta diferencia en sus resistencias mecánicas.

Para estudios posteriores se propone continuar con la cantidad de sustitución de fibra de nopal en 1.5% debido a los resultados favorables de durabilidad, teniendo en consideración que se pudiera controlar de una manera más precisa la fabricación de los especímenes, y así disminuir la cantidad de variables durante la experimentación y con ello garantizar un mejor comportamiento en las pruebas mecánicas y de durabilidad.

En lo que respecta a la combinación de fibra de nopal y almidón, se recomienda proponer nuevos porcentajes de sustitución en las combinaciones y comparar los resultados con los de la actual investigación.

Finalmente, se logró demostrar que estas sustituciones orgánicas permiten obtener materiales con un comportamiento físico-mecánico y de durabilidad aceptable, que superen las características de un mortero convencional, y con ello disminuir el consumo y empleo de cemento Portland, así como reducir las emisiones a la atmósfera debido a la producción de este cemento.

Dado que se tuvieron buenos resultados en las distintas mezclas elaboradas, se concluye que los materiales pueden emplearse en la aplicación de recubrimientos o de restauración en obras civiles de elementos de concreto, siendo estos los usos habituales de un mortero hidráulico.

Es importante resaltar que las condiciones agresivas del ambiente han incentivado a que se analicen de forma más precisa a los materiales que conforman los elementos de una estructura de concreto, para que logre cubrir su vida útil en condiciones óptimas de servicio, es indispensable considerar un diseño por durabilidad adecuada a las condiciones atmosféricas en donde se construya y no solo diseñar bajo criterios de resistencia mecánica.

Introducción

En los últimos años se ha buscado mejorar las características físicas, químicas y mecánicas de los concretos y los morteros, a través de incorporación de aditivos industriales, pero también se ha buscado utilizar alternativas orgánicas que sustituyan la cantidad de cemento de las mezclas, esto como una vía sustentable para reducir el consumo de cemento en la industria de la construcción, pero también el uso de materiales disponibles localmente que mejoren otras propiedades del concreto y del mortero.

En el capítulo 1 se realiza una revisión bibliográfica histórica y del estado del arte sobre el uso de aditivos en concreto o morteros en la construcción, encontrando una lista de aditivos industriales que la normativa y las asociaciones técnicas del cemento y del concreto han aprobado para su uso, pero también se identificó que los constructores históricamente han hecho uso de los materiales locales de la región para incorporar en las mezclas, con el objeto de obtener una mejora en ciertas propiedades, como su trabajabilidad, su retardamiento de fraguado, su impermeabilidad, su durabilidad, etc. En la construcción de estos antecedentes se identificó el uso de materiales orgánicos como aditivos en las mezclas, tales como aceites, fibras naturales, sangre, etc.

El estado del arte nos mostró que la fibra del nopal ha sido analizada y probada en ciertos porcentajes y condiciones, así como los almidones, sin embargo, se evaluó que existía la posibilidad de evaluar combinaciones y otras proporciones.

El objetivo general de la presente investigación es el de diseñar y elaborar mezclas de mortero de base cemento incorporando fibra de nopal (FN) y fécula de maíz (MZ) como sustituto parcial de cemento Portland (CP) en porcentajes óptimos analizados, para posteriormente evaluar su desempeño por resistencia mecánica y durabilidad.

Para evaluar las matrices cementicias con sustituciones orgánicas se requiere conocer y caracterizar los materiales que se utilizarán en la investigación, los cuales serán descritos a continuación, de esta manera el capítulo 2 se desarrolló una caracterización de los materiales a utilizar. Este capítulo pretende ofrecer información básica para los lectores sobre los cementos y sus propiedades (físicas, químicas y mecánicas), sobre los agregados pétreos y sus propiedades (físicas, químicas y mecánicas), el agua y sus especificaciones para su uso en la elaboración de morteros, los aditivos empleados en la investigación, el mortero y su clasificación, y los materiales como sustitución parcial del cemento de origen orgánico.

El capítulo 3, describe la metodología empleada para la realización de la experimentación de las mezclas con sustituciones orgánicas y la mezcla testigo. El proceso metodológico implica evaluar la calidad de los materiales (propiedades

físico-mecánicas) a través de las diversas normativas vigentes, el control de la calidad del mortero fresco a través de los estándares normativos que le aplican, y el control de calidad de los ensayos en el mortero endurecido. Esto último implica la realización de pruebas no destructivas, pruebas destructivas y pruebas de durabilidad.

Los resultados de los ensayos y del control de calidad se presenta en el capítulo 4, donde se analiza y se discute la información obtenida. En este apartado se presentan los resultados realizados para evaluar las propiedades físico-mecánicas de los morteros y la caracterización de los materiales. Los resultados de los ensayos realizados para el mortero fresco y los resultados de las pruebas para el mortero endurecido (pruebas no destructivas, pruebas destructivas y pruebas de durabilidad).

En el capítulo 4 se incluye un resumen de los resultados de los ensayos para cada mezcla de estudio: un mortero control (cemento-arena-agua); y dos mezclas con sustitución parcial de fibra de nopal (FN) 0.5% y 1.5% respectivamente, y una mezcla de 2% de almidón con 0.5% de fibra de nopal (MZ 2% - FN 0.5%), así como una breve discusión de los mismos.

Finalmente se presenta las conclusiones, las cuales detallan los resultados alcanzados en la investigación en relación a las pruebas no destructivas, pruebas destructivas y pruebas de durabilidad.

La sustitución de fibra de nopal y almidón densificó notablemente a la matriz cementicia, lo que dio como resultado el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas, así como las de durabilidad prevaletes en morteros convencionales.

Aunque los resultados son favorables se recomienda proponer nuevos porcentajes de sustitución en las combinaciones y comparar los resultados con los de la actual investigación.

Dado que se tuvieron buenos resultados en las distintas mezclas elaboradas, se concluye que los materiales pueden emplearse en la aplicación de recubrimientos o de restauración en obras civiles de elementos de concreto, siendo estos los usos habituales de un mortero hidráulico.

1. Antecedentes

En la construcción, desde sus inicios los seres humanos siempre han tenido la necesidad de desarrollar elementos de piedra ligados con un material cementante que permitiera conformar una estructura simple como la edificación de una casa-habitación que les fuera resistente para su protección, los cuales han permanecido hasta nuestros días en muchos casos.

El material cementante que se ha utilizado a lo largo de la historia es el cemento, que ha sido el principal material de construcción empleado por la humanidad, puesto que los cementos portland y sus derivados están formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza.

Los griegos y los romanos fueron grandes precursores de los cementos, con compuestos de caliza calcinada, morteros, toba volcánica, cemento puzolánico, etc. En 1824, Joseph Aspdin en Leeds, Inglaterra, calcinó en un horno una mezcla de 3 partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual la molió y pulverizó consiguiendo la patente para producir el primer Cemento Portland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Portland. El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845, cuando logró con éxito, fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clínter, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante.

Históricamente, los constructores han buscado reducir los costos que representa una mezcla de concreto en la construcción, por lo que se han incorporado a las mezclas aditivos, los cuales en algunos casos han mejorado y en otros reducido la calidad y la durabilidad del concreto.

Este tipo de aditivos para las mezclas han sido de origen natural, tales como arcilla o cal, pero también se han utilizado aditivos orgánicos.

Álvarez *et al* (1995), con base en el artículo de Hennig & Bleck (1968), los cuales consideran que no existe fundamento alguno para sustentar la teoría de que se adicionaron proteínas animales a los morteros medievales. Adicionalmente los autores establecen que la adición de sustancias como la clara de huevo, leche, caseína o sangre, no está probada en la literatura histórica. Hennig & Bleck (1968), han examinado muestras de morteros de los siglos XI al XVII en Alemania, y nunca han podido establecer la presencia de materias orgánicas.

Sin embargo, en el estudio realizado por el Sickels (1981) describe el uso de compuestos orgánicos como aditivos para la restauración de obras históricas.

Los aditivos más comunes eran la cola animal, la caseína y otros productos lácteos, la cerveza, la grasa animal, el aceite de linaza, la albúmina, la sangre y las resinas naturales (Sickels, 1981; Pecchioni *et al*, 2008).

Rampazzi *et al* (2015), en su artículo destaca un mortero especial llamado "maltha", compuesto de cal compuesta de cal apagada en vino, manteca de cerdo y zumo de higo, y destinada a los espacios húmedos, como las termas; describe un mortero elaborado con cal en pasta y queso, que se adhería muy bien a los bloques de piedra; además de una mezcla similar, con la adición de aceite para mejorar la impermeabilidad de los morteros utilizados en acueductos y cisternas.

Los compuestos orgánicos mencionados anteriormente fueron utilizados sin conocimiento específico sobre las propiedades que estos pudieran tener en la mezcla, sino que su utilización se debió a la observación empírica del comportamiento de estos compuestos y de su disponibilidad local. Con el tiempo, se pudo observar el desempeño y los resultados alcanzados.

Los materiales a base de carbohidratos, como la malta, el azúcar, la melaza y la goma arábiga. La cal y los derivados del azúcar reaccionan rápidamente para formar sacarato de calcio, que refuerza las propiedades de cohesión de los morteros y la resistencia a la tracción, especialmente en un clima cálido y seco, y en el caso de grandes mamposterías, donde la cal fragua lentamente (Carbonara 2007).

Cárdenas *et al* (1998), investigaron el papel de los polisacáridos en los morteros de cal también mezclados con nopal. El jugo de nopal se añadía comúnmente a los morteros de las construcciones históricas mexicanas, para mejorar el rendimiento contra la penetración del agua y el agrietamiento. Cárdenas demostró que las propiedades mecánicas aumentaban debido a la formación de una red interpenetrada de mucílago de polisacáridos de nopal y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

1.1 Aditivos para concretos

Un aditivo se puede definir como un producto químico que, excepto en casos especiales, se agrega a la mezcla de concreto en cantidades no mayores al 5 por ciento por masa de cemento durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de la colocación del concreto, para el propósito de realizar una modificación específica a las propiedades estándar del concreto (Neville & Brooks, 1999).

La interpretación que se le puede dar a las distintas definiciones de los aditivos es que un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento (Arguello, 2012).

Los aditivos son aquellos ingredientes que se incorporan al concreto que, de manera adicional al Cemento Portland, el agua y los agregados, ya sea antes o durante el mezclado.

La empresa CEMEX (2022), de acuerdo a sus funciones, clasifica a los aditivos para el concreto de la siguiente manera:

- Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire)
- Aditivos reductores de agua
- Plastificantes (fluidificantes)
- Aditivos aceleradores (acelerantes)
- Aditivos retardadores (retardantes)
- Aditivos de control de la hidratación
- Inhibidores de corrosión
- Reductores de retracción
- Inhibidores de la reacción álcali-agregado
- Aditivos colorantes
- Aditivos diversos:
 - Para mejorar la trabajabilidad y la adherencia.
 - Impermeabilizantes
 - Para lechadas
 - Formadores de gas
 - Anti-deslave
 - Espumantes
 - Auxiliares de bombeo

La normativa ASTM C494/C494M-17 establece 8 tipos de aditivos:

- Tipo A: Reductores de agua
- Tipo B: Retardador de fraguado
- Tipo C: Acelerador de fraguado
- Tipo D: Reductor de agua y retardador
- Tipo E: Reductor de agua y acelerador
- Tipo F: Reductor de agua de alto rango (plastificantes)
- Tipo G: Reductor de agua de alto rango y retardador
- Tipo S: Aditivos con características especiales

El uso de aditivos históricamente se ha debido a la necesidad de reducir los costos en la construcción, y en las últimas décadas para mantener y asegurar la calidad del concreto durante las diferentes etapas (mezclado, transporte, colocación y fraguado).

En los últimos años, las investigaciones en concreto han hecho uso de los aditivos para mejorar de manera efectiva las propiedades del concreto.

El Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) (2010), en su reporte sobre aditivos para las mezclas de concreto, sugiere diversos materiales, cuyas características permiten mejorar las propiedades del concreto, tales como reducir la cantidad de agua, inhibir la corrosión o la permeabilidad, el comportamiento al clima frío, etc.

1.2 Aditivos orgánicos

Dentro de la industria de la construcción se han utilizado un amplio rango de materiales orgánicos para mejorar el desempeño y efectividad de los concretos.

El ACI (2010), sugiere para la mejora de ciertas propiedades del concreto, los siguientes:

- Para la reducción de la entrada de aire, se pueden usar compuestos hidrosolubles como sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados.
- Los aditivos acelerantes orgánicos más comunes en esta clase son la trietanolamina y el formiato de calcio, los cuales se utilizan comúnmente para compensar los efectos retardantes de los aditivos reductores de agua o para proporcionar una aceleración no corrosiva, incluyendo sales de calcio de ácido carboxílico.
Se ha descubierto que otros compuestos orgánicos para acelerar el fraguado del cemento, estos incluyen: la urea, el ácido oxálico, el ácido láctico, diversos compuestos cíclicos, y de condensación de aminas y formaldehído. Los compuestos orgánicos como la trietanolamina y el formiato de calcio parecen ser sensibles en su acción aceleradora a la mezcla en particular de concreto a la que se agregan, y a la temperatura ambiente.
- Para la reducción de agua, se pueden modificar las formulaciones utilizando otros materiales, como agentes tensoactivos no iónicos, aminas y sus derivados, fosfonatos orgánicos, incluidas las sales de zinc, boratos, fosfatos y determinados compuestos poliméricos, como éteres de celulosa, siliconas y derivados de acrilato de hidrocarburos sulfonados.
- En mezclas de concreto con muy alta resistencia inicial, las características de fraguado se controlan mediante la adición de hemihidrato de sulfato de calcio o de sulfato de sodio y se amplían con un retardador orgánico como el ácido cítrico; de ahí que también se conozca como cemento de fraguado regulado.
- Para el control extendida de la hidratación durante el fraguado, los materiales más eficaces son los ácidos carboxílicos y los ácidos y sales orgánicas que contienen fósforo.
- Como inhibidor de la corrosión, actualmente se conocen cuatro aditivos: carboxilato de amina, una emulsión orgánica de éster de amina, nitrito de calcio y una sal orgánica de ácido dicarboxílico de alqueno.

El uso de los aditivos orgánicos se ha continuado a través de investigaciones, donde con base en las muestras de análisis en edificios históricos, en los cuales se identificaron la presencia de diversos compuestos orgánicos tales como:

- Luxan *et al* (1995) identificaron la presencia de cera, resina y aceite en los antiguos morteros de yeso utilizados en la Basílica de Santa Engracia (siglo XVI, Zaragoza, España).
- A través de análisis HPLC (High Performance Liquid Chromatography), Kurugöl & Güleç (2012), han identificado el uso de la clara de huevo en los morteros de cal bizantinos.
- El arroz pegajoso se ha encontrado en morteros del siglo XVIII (Zeng *et al* 2008).
- También se han identificado gomas vegetales mediante cromatografía iónica en pinturas murales de tumbas macedonias (Grecia) de los siglos IV a III a.C. (Colombini *et al.* 2002).

A pesar de que diversas investigaciones han demostrado del uso de compuestos orgánicos como aditivos en concretos o morteros, estos no fueron documentados adecuadamente para que se pudiera entender y replicar el conocimiento de esas épocas.

Rampazzi *et al* (2015), explica que los aditivos en los concretos modernos se utilizan principalmente para retardar o acelerar el tiempo de fraguado. Cuando se añade a los morteros de reparación, la goma de cactus aumenta el rendimiento mecánico (Alonso *et al* 2002) y el frente de carbonatación (Ventola *et al* 2011). La plasticidad y la resistencia del cemento Portland también aumentan cuando se mezcla con extracto de nopal, debido a la formación de compuestos con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Chandra *et al* 1998).

Por otra parte, el uso de leche tiene un mejor comportamiento elástico y un mejor desempeño a largo plazo, mientras que la adición de sangre de bovino tuvo un comportamiento mecánico medio, pero una buena reactividad al medio ambiente (Alonso *et al* 2002).

El uso de aceite de oliva (un material graso) como aditivo redujo el sistema de poros a la mitad (en porcentaje de volumen) y disminuyó el tamaño de los poros Ventola *et al* 2011).

2. Caracterización de los materiales

Para evaluar las matrices cementicias con sustituciones orgánicas se requiere conocer y caracterizar los materiales que se utilizarán en la investigación, los cuales serán descritos a continuación.

2.1 Cemento

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto.

Para la construcción, el cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer en contacto con el agua o sumergidos en ella, en virtud de su reacción química, por lo que se les da el nombre de cementos hidráulicos (Neville, 2013).

2.1.1 Cemento Portland

El Cemento Portland está compuesto principalmente de materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla o pizarra. También se utiliza la marga, que es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos.

La materia prima para la fabricación del cemento portland se encuentra en casi todos los países, por lo que se encuentran operando fábricas de cemento en todo el mundo.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura de aproximadamente 1,450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como Clínger. El Clínger se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, después se adiciona un poco de yeso, y el producto resultante es el cemento portland comercial que tanto se usa en todo el mundo.

El Clínger está compuesto por diversos elementos como el aluminato tricálcico, silicato bicálcico y tricálcico y ferrito aluminato tetracálcico.

La mezcla y la trituración de las materias primas pueden efectuarse tanto en condiciones húmedas como secas, pasando por un horno hasta obtener bolas de color negro, brillante y duro, para posteriormente mezclarlo con yeso para evitar un fraguado relámpago del cemento.

2.1.2 Clasificación y tipos de cemento

La norma mexicana “NMX-C-414-ONNCCE-2017” clasifica a los diversos tipos de cemento de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en territorio nacional, dicha norma hace mención a la clasificación del cemento de acuerdo a sus componentes, a su resistencia a la compresión y de acuerdo a sus características especiales, como lo muestra la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los cementos en México

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

A continuación, se realiza una comparativa de la norma vigente en México con la norma internacional ASTM-C-150/C150M (2016), que especifican las características del Cemento Portland, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Comparativa del cemento en función de su desempeño

NMX-C-414-ONNCCE	NORMA ASTM C-150/C150M
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 Y CPC 30R	Tipo I (Portland normal)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS	Tipo II (Portland moderada resistencia a los sulfatos)
CPO 40, CPO 40R Y CPC 40R	Tipo III (Portland fraguado rápido, alta resistencia inicial)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH	Tipo IV (Portland bajo calor de hidratación)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial RS	Tipo V (Portland alta resistencia a los sulfatos)
CPO o CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali; todos los tipos

Fuente: Elaboración propia con base en “NMX-C-414-ONNCCE-2017” y “ASTM-C-150/C150M (2016)”

2.1.3 Propiedades del cemento

La calidad del cemento se entiende como el grupo de propiedades que caracterizan el cemento en su uso final como aglomerante hidráulico en concretos y morteros, utilizados para actividades de construcción.

El Clínter de cemento portland es el factor más importante en cuanto a las propiedades del cemento.

El Clínter se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y pequeñas cantidades de otras materias.

El Clínter de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio [3CaO.SiO₂] y [2CaO.SiO₂], estando constituido el resto por fases del Clínter conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos. La relación en masa (CaO)/(SiO₂) no será menor de 2.0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5.0 % en masa. La composición química del Clínter se da en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición química del Clínter (% en masa)

Fase	Formula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S	46-79	61
Silicato bicálcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S	5-30	15
Ferritoaluminato tetracálcico	4CaO (Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	C ₄ (A,F)	4-16	8
Aluminato tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A	6-18	12
Cal libre	CaO	C	0.1-4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0.7-1.5	1.5

Fuente: San Juan & Chinchón (2014)

NOTAS:

C = Óxido de Calcio: "Cal"

S = Dióxido de Silicio: "Silicato"

A= Óxido de Aluminio: "Aluminato"

F= Óxido de Hierro: "Hierro"

Las cantidades efectivas que conforman cada tipo de cemento varían de acuerdo a su composición química, los cuales contribuyen a la resistencia a la compresión del concreto.

Todos los constituyentes del cemento portland hidratado contribuyen en alguna medida a la resistencia, hasta el grado de que todos los productos de la hidratación llenen espacios y, así, reduzcan la porosidad. (Neville, 2013).

2.1.4 Propiedades físicas del cemento

Las propiedades físicas del cemento se pueden determinar mediante algunos ensayos de laboratorio. Las principales propiedades del cemento son: la finura, la fluidez o consistencia normal, la densidad, la expansión, los tiempos de fraguado y el fraguado rápido.

2.1.4.1 Finura

El proceso de molienda de Clínter y yeso determina la finura del cemento, que mide el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia (CETESA, 2022).

2.1.4.2 Consistencia normal

Es la propiedad que indica el grado de fluidez o la dificultad con que la mezcla puede ser manejada. La cantidad de agua que se le agrega al cemento, le proporciona una determinada fluidez. Existe una determinada fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua; es lo que se llama consistencia normal (CETESA, 2022).

En el caso de los cementos que contienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.4.3 Densidad

Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento normal suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de los cementos adicionados, es menor porque el contenido de Clínter por tonelada de cemento es inferior, y su valor normalmente es del orden de 2.90 g/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. Esta medida es indispensable en el diseño y control de mezclas de concreto, en donde se requiere conocer cuánto espacio ocupa determinada masa de cemento (CETESA, 2022).

La determinación de la densidad del cemento se puede hacer por varios métodos, entre el que se destaca la norma ASTM C188, la cual utilizar el frasco de *Le Chatelier*.

2.1.4.4 Expansión

Un elemento clave del cemento, es que ninguno de sus componentes, al hidratarse, sufran algún tipo de expansión que pudiera ser destructiva.

La mezcla de cemento al endurecer disminuye de volumen, fenómeno denominado retracción. La casi totalidad de la retracción ocurre en los primeros 2 ó 3 meses de hidratación del cemento, mientras que la posible expansión del cemento proviene

de otras fuentes distintas a sus componentes principales, tales como la periclasa (MgO cristalino), de la cal libre (CaO) y el CaSO₄ (CETESA, 2022).

Las normas que limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo autoclave, se encuentran establecidos en la norma NMX-C-062-ONNCCE-2010 o su equivalente ASTM C151/C151M. La cual consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25.4 cm elaboradas de mezcla de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

2.1.4.5 Tiempo de fraguado

Este término es utilizado para describir la rigidez de la mezcla, es decir para especificar el cambio de estado fresco a estado endurecido.

De acuerdo a (CETESA, 2022), durante el proceso de fraguado se presentan diferentes tipos:

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la mezcla plástica formada por la hidratación del cemento pierde su fluidez, llegando a disminuir su viscosidad y por tanto su plasticidad.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la mezcla de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la mezcla se encuentra dura y por lo tanto va adquiriendo resistencia mecánica.
- **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la mezcla, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la mezcla de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. Esta rigidización es producto de la hidratación del yeso y para regresar la pasta de cemento a su estado de trabajabilidad inicial, simplemente se prolonga el tiempo de mezclado sin adicionar agua, porque esta altera la relación agua/cemento y por consiguiente disminuiría la resistencia.

2.1.5 Propiedades mecánicas del cemento

Las propiedades mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

2.1.5.1 Resistencia a la compresión

Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa o en libras por pulgada cuadrada (psi).

Las pruebas de resistencia a la compresión, se emplean para determinar si la mezcla cumple con la resistencia especificada ($f'c$) desde el diseño. Para el presente estudio se utiliza el ensayo de acuerdo a la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015 o su equivalente ASTM C109/C109M, a través de cubos de dos pulgadas (50mm) de arista.

2.1.5.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas de manera perpendicular a su eje longitudinal.

El objetivo del ensayo de flexión es determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con los esfuerzos y deformaciones. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR) en libras por pulgada cuadrada (MPa).

En el presente estudio se realizará con la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero en prismas de 4 X 4 X 16 cms.

2.1.5.3 Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites enunciados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Componentes de los cementos en México

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					
		Principales					Minoritarios (1)
		Clínker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto (3)	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	61-0	-	-	-	0-5

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

NOTAS:

- (1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales representados en la tabla.
- (2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.
- (3) El Cemento Portland Compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con Clínker + yeso.

Adicionalmente los requisitos que deben cumplir los componentes principales se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Requisitos de los componentes principales

Componente principal	Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria Granulada de Alto Horno	75	-
Puzolana	75	-
Humo de Sílice	100	-
Caliza	-	75

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30R y 40R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Especificaciones físicas

Clase Resistente	Resistencia a compresión MPa			Tiempo de fraguado (mín.)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días mínimo	28 días mínimo	Máximo	Inicial mínimo	Final máximo	Expansión máximo	Contracción máximo
20	-	20	40	45	600	0.8	0.2
30	-	30	50	45	600	0.8	0.2
30R	20	30	50	45	600	0.8	0.2
40	-	40	-	45	600	0.8	0.2
40R	30	40	-	45	600	0.8	0.2

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas de la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Especificaciones químicas

Propiedades	Tipos de Cemento	Especificación (% en masa)
Perdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO ₃)	Todos	Max 4.0 %

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.1, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Especificaciones del cemento con características especiales

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por reacción álcali agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
			1 año	14 días	56 días	7 días	
RS	Resistente a los Sulfatos	0.1	-	-	-	-	-
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	-	0.02	0.06	-	-	-
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2017

2.1.6 Caracterización del cemento utilizado

El cemento empleado en esta investigación es denominado CPC 30R RS, lo cual representa a un Cemento Portland Compuesto de clase 30, con una resistencia especificada de 30 MPa a los 28 días y resistente a los sulfatos.

Un Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta un bajo contenido de aluminato tricálcico (C_3A). La norma inglesa para este cemento, BS 4027:1980 (actualizada en 1991), estipula un contenido de C_3A , del 3.5% máximo. La finura mínima es 2500 m^2/kg . El cemento resistente a los sulfatos debe cumplir con la norma inglesa BS 12:1996 para Cemento Portland normal.

En los Estados Unidos de América, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C150/C150M. Esta especificación limita el contenido de C_3A al 8% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), y del contenido de C_3A al 8% máximo. El contenido de óxido de magnesio está limitado a un 6%.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato (Arguello, 2012).

El cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, se evite que la sustancia que se forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997).

2.2 Agregados pétreos

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014, los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.

Los agregados le proporcionan el cuerpo al concreto y mortero, proporcionan resistencia y estabilidad volumétrica. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos en la interfaz del agregado y la mezcla de cemento (Moreno, 2012).

Los agregados ocupan casi un 80% del volumen del concreto, por lo que sus características y propiedades impactan considerablemente en el desempeño y durabilidad de un concreto. De esta manera es importante considerar la mineralogía de sus componentes y de las condiciones físicas de las partículas (distribución de tamaños, forma, textura, etc.).

2.3 Propiedades de los agregados

La principal función de los agregados en el concreto es la de erigir un esqueleto rígido y estable, los cuales son unidos mediante la mezcla agua-cemento.

Tratándose de materiales es importante conocer las propiedades químicas, físicas y mecánicas.

2.3.1 Propiedades químicas

La caracterización química que se requiere realizar en los agregados, principalmente para evitar reacciones no esperadas en la mezcla del concreto, por lo que las pruebas que se realizan buscan evitar la presencia de sustancias agresivas, componentes o minerales agresivos, tales como la sílice activa.

De acuerdo al Instituto del Concreto (1997), se evalúan las siguientes propiedades en los agregados:

- **Epitaxia:** Es una reacción química favorable de los agregados. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la mezcla de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la mezcla y pérdida de resistencia del concreto.

2.3.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas que tienen mayor relevancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

2.3.2.1 Granulometría

La granulometría es el estudio que permite medir los granos y evaluar la distribución de los tamaños en una muestra de suelo. El resultado obtenido es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados de una muestra.

La proporción se indica de acuerdo a los tamaños (de mayor a menor), los cuales pasaron o fueron retenidos de acuerdo a los tamices (mallas) utilizados en el ensayo.

La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. Los morteros se elaboran con todo el material que pasa la malla No. 4.

2.3.2.2 Porosidad y absorción

La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia y la mezcla de cemento hidratada, en la resistencia del concreto, así como su estabilidad química y en la resistencia a la abrasión (Neville & Brooks, 1999).

Otro aspecto, es que cuando más poroso es el material, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menos absorción tenga, es más compacto y de mejor calidad.

2.3.2.3 Masa unitaria

La masa unitaria de un agregado es la relación entre el peso de una determinada cantidad de este material y el volumen ocupado por el mismo.

La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1997).

2.3.2.4 Forma

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del concreto fresco y endurecido, particularmente en la trabajabilidad y en su resistencia mecánica.

Algunas de las formas de los agregados son: angular, sub-angular, sub-redondeada, redondeada, o muy redondeada. Por su tamaño son: agregados finos (arenas) y agregados gruesos (gravas).

A continuación, se presentan algunas consideraciones:

- Los ángulos de las partículas y los tamaños pueden demandar más o menos arena en los concretos.
- Formas delgadas y alargadas dan baja resistencia y calidad al concreto.
- Los materiales triturados ofrecen alta resistencia a la flexo tracción.

2.3.2.5 Textura

La textura de la superficie del árido puede ser lisa o rugosa. Una superficie lisa puede mejorar la trabajabilidad, pero una superficie más rugosa genera una unión más fuerte entre la pasta y el árido creando una mayor resistencia.

La textura de la superficie de los áridos es una propiedad que se mide en función del grado relativo de pulido o mate, liso o rugoso de las superficies de las partículas.

2.3.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas, en particular, son atributos físicos de un material que indican el comportamiento del mismo cuando se somete a cualquier carga externa. Estas propiedades no son constantes, sino que están en función de variables ambientales, la tasa de carga, etc.

Los agregados que se utilicen en el concreto deben tener propiedades mecánicas que se ajusten a las recomendaciones establecidas en las normas técnicas.

2.3.3.1 Dureza

La dureza de un material es su resistencia a la abrasión o al rayado. Otra manera de verlos, es cuando un material se carga en la zona plástica, la oposición localizada que ofrece a la deformación plástica es una manifestación de su dureza.

Esta propiedad depende principalmente de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado.

La dureza del agregado es una propiedad crítica para la toma de decisiones en la selección de los materiales para un concreto.

2.3.3.2 Resistencia

El esfuerzo máximo que muestran los agregados cuando se someten a compresión da su resistencia a la compresión.

Las piedras trituradas se obtienen aplastando cantos rodados de gran tamaño. Por tanto, los agregados son materiales intrínsecos y su resistencia a la compresión depende en gran medida del tipo de roca que se aplaste (en el caso de los agregados gruesos).

En las mezclas de concreto es muy importante que los agregados tengan una resistencia mayor a la del cemento, ya que no se debe permitir una falla a la ruptura debido al agregado.

2.3.3.3 Tenacidad

Cuando un material se carga de manera incremental, a partir de una determinada carga comienza a deformarse plásticamente. La capacidad de un material de soportar la carga deformándose en el rango plástico sin fracturarse o fallar se denomina tenacidad.

En los agregados la tenacidad depende del origen y de su manejo.

2.3.3.4 Adherencia

Es la interacción que existe en la zona de contacto entre agregado y la mezcla agua-cemento, la cual es producida por fuerzas/reacciones de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la mezcla de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto.

La adherencia depende de la calidad de la mezcla de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión.

Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.4 Caracterización del agregado de la investigación

El agregado fino utilizado en los morteros fue obtenido del banco de materiales llamado “Joyitas” que está ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia-Quiroga. El material obtenido es volcánico y el tratamiento que se le ha dado al material es trituración parcial y cribado. El banco no requiere explosivos para la obtención del material y económicamente hablando el material es aceptable.

El agregado volcánico del banco “Joyitas” fue tamizado por la malla No. 4 para llegar al tamaño máximo de agregado fino. Los usos probables que se le dan a ese material son como material de revestimiento sub – base, base, y en la elaboración de concreto hidráulico.

2.4 Agua

El agua es el ingrediente clave, que al mezclarse con el cemento forma una pasta que une los agregados. El agua provoca el endurecimiento del concreto mediante un proceso llamado hidratación. El contenido de agua proporciona propiedades como la trabajabilidad y la resistencia a la compresión, la permeabilidad o la estanqueidad, la durabilidad y la resistencia a la intemperie, la contracción por secado y el potencial de agrietamiento.

La relación entre la cantidad de agua, menos la cantidad de agua absorbida por los agregados, y la cantidad de materiales cementantes en peso en el concreto se

denomina relación agua-cemento y se conoce comúnmente como relación w/cm. La relación w/cm es una modificación de la histórica relación agua-cemento (relación w/c) que se utilizaba para describir la cantidad de agua, excluyendo la absorbida por los agregados, con respecto a la cantidad de cemento portland en peso en el concreto. Dado que la mayoría de los concretos actuales contienen materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes, cemento de escoria, humo de sílice o puzolanas naturales, la relación w/cm es más apropiada.

Dado que el agua tiene una función fundamental en los concretos, su calidad es controlada mediante normativas específicas.

2.4.1 Especificaciones del uso del agua en morteros

El agua que se pretenda usar en la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas el agua de mar, debe cumplir con los requisitos que aparecen en la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 (Véase Tabla 2.9). El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites especificados en la Tabla 2.8, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla 2.9 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulforesistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el Cl (a)		
Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO ₄ ⁼ (a)	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

Fuente: NMX-C-122-ONNCCE-2004

NOTAS:

- (a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.
- (b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.
- (c) Cuando se use cloruro de calcio $CaCl_2$ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

Un exceso de impurezas en el agua puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, y también puede ser el causal de la eflorescencia, el manchado, la corrosión del refuerzo, la inestabilidad del volumen y la reducción de la durabilidad. Por lo que las normativas establecen límites máximos de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos suspendidos en el agua. Para ello es importante realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas. La tabla 2.10 indica los efectos negativos que las diferentes impurezas pueden provocar en los concretos.

Tabla 2.10 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencia	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire Incluido	Hidratación
pH	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	X	X	X	X	X	---	---	---
Sulfatos	X	X	X	X	X	X	---	---
Cloruros	X	X	X	X	---	---	---	---
Hidratos de carbono	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles en éter	X	X	---	---	---	---	X	X

Fuente: Instituto del Concreto, 1997.

2.4.2 Caracterización del agua utilizada en la investigación

El agua proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la cual es analizada con frecuencia para evaluar el cumplimiento de la normativa.

2.5 Aditivos

Como se mencionó en el capítulo anterior, el uso de aditivos es muy común en los concretos dentro de la industria de la construcción. En este apartado se describirá el aditivo utilizado en la investigación.

2.5.1 Aditivos empleados en la Investigación

El aditivo que se utilizó en esta investigación cumple con las características siguientes: es un aditivo plastificante (fluidificante), y su presentación es en polvo con un color café oscuro (distribuido principalmente para la construcción).

Los aditivos plastificantes o reductores de agua, son compuestos orgánicos e inorgánicos que permiten emplear menor agua de la que se usaría en condiciones normales en el concreto, produciendo mejores características de trabajabilidad y también de resistencia al reducirse la relación agua-cemento (Tello, 2019).

Estos aditivos trabajan con base al llamado efecto de superficie, en el que crean una interface entre el cemento y el agua en la mezcla, reduciendo las fuerzas de atracción entre las partículas, con lo que se mejora el proceso de hidratación.

Un aditivo de este tipo usualmente reduce el contenido de agua por lo menos en un 5% a 10% y la dosificación normal oscila entre el 0.2% al 0.5% del peso del cemento, usados diluidos en el agua de mezcla.

2.6 Mortero

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Sánchez, 1996).

La selección de los morteros se debe principalmente a su trabajabilidad, la capacidad para obtener una alta resistencia inicial, la retención del agua, la velocidad de endurecimiento, retracción, adherencia y durabilidad.

2.6.1 Tipos y usos del mortero

Existen dos tipos de morteros, los aéreos y los hidráulicos:

- **Mortero aéreo:** Es aquel que se endurecen al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada, los cuales fraguan lentamente por un proceso de carbonatación.
- **Mortero hidráulico:** Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento.

De acuerdo a su composición pueden ser:

- **Mortero físico:** Este proceso pasa de estado pastoso o semilíquido a un sólido mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos. Estos pueden ser los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los morteros con aditivos a base de materiales sintéticos.
- **Mortero químico:** El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química. En esta clasificación se encuentran los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

De acuerdo a los materiales que compongan el mortero, pueden encontrarse los morteros calcáreos, morteros de cal y Cemento Portland, y morteros de cemento.

Los morteros más comunes y puestos en estudio en esta investigación, son los de cemento y están compuestos de:

MORTERO = *AGLUTINANTE* + *MATERIAL INERTE* + *LIQUIDO DE AMASADO*

Mortero = (cemento) + (arena) + (agua)

De acuerdo al uso deseado, se debe utilizar diferente granulometría. En el reglamento de construcción del estado de Michoacán se especifica una resistencia mínima del mortero de 4 MPa para uso estructural y lo que especifique la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014, y para usos no estructurales tales como pegar, juntar y repella, se establece en la norma NMX-C-529-ONNCCE-2017. En esta investigación se proponen estos usos; los cuales se logra utilizando todos los tamaños de la arena que se utilizan para elaborar concreto.

2.7 Materiales como sustitución parcial del cemento de origen orgánico

En la presente investigación se utilizará fibra deshidratada de cactus opuntia y almidón del maíz.

2.7.1 Fibra de Cactus de nopal deshidratada

El nopal es uno de los recursos de mayor importancia económica de la flora mexicana. Actualmente, por sus varias propiedades nutritivas, químicas, industriales, ecológicas, medicinales y simbólicas, entre otras, el nopal es uno de los recursos vegetales más importantes para los habitantes de las zonas áridas y semiáridas de México (Biodiversidad, 2022).

2.7.1.1 Características del cactus de nopal

El género *Opuntia* debe su nombre a un pueblo antiguo de Grecia llamado Opus u Opuncia, de la región de Leócrida, Beocia, donde se dice que crecía una planta similar a las *cactáceas*.

Los nopales son el género de mayor distribución de la familia de las *cactáceas* y fueron nombrados por Linneo en 1753 como *Cactus Opuntia*. Posteriormente, Miller corrigió y *Opuntia ficus-indica* fue designada como especie tipo del género, del cual hoy se reconocen cerca de 220 especies y en México existen entre 60 y 90. La complejidad en su nomenclatura es reflejo de su diversidad morfológica (Biodiversidad, 2022).

Actualmente, los científicos relatan que el nopal es una planta llena de secretos y de beneficios que al paso del tiempo se han ido revelando. Uno de estos, es el uso del nopal como aditivo en el concreto, con el objetivo de aumentar su resistencia,

manejabilidad y disminuir su costo (Arguello, 2012). También se ha empleado como inhibidor de la corrosión (Torres et al, 2012; Del Valle et al, 2015).

2.7.1.2 Antecedentes del cactus de nopal

El origen e historia del nopal están íntimamente relacionados con las civilizaciones más antiguas de nuestro país, pero en especial con las mesoamericanas y de manera particular, con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica, fueron las que iniciaron su cultivo de modo formal.

Los antiguos relatos hacen mención a la gran variedad de nopales que existían, así como el uso que se les daba. Al acercarse la época de fructificación de los nopales, los pobladores se alimentaban de sus frutos. Sin duda, los nopales influyeron en el asentamiento de tribus errantes que concurrían en la época de fructificación a las zonas habitadas por estas plantas; y acababan por fijar ahí su residencia.

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en excavaciones de Tamaulipas y Puebla. En éstas se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, con antigüedad de siete mil años (Torres *et al*, 2010a).

2.7.1.3 Tipos y usos de la fibra de nopal dentro de la construcción

Los usos tradicionales que tiene el nopal y sus derivados, además del valor que tiene como alimento en forma directa en México, se suma su aplicación en rubros tan ajenos a los anteriores, como el de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivos, como infiltradores de suelo entre otros (Torres *et al*, 2010a).

En México, existe evidencia histórica del uso del mucílago de nopal en combinación con cal, debido a que aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar en el yeso en paredes de adobe y de ladrillo; y también como una barrera impermeable al agua en el yeso. A partir del jugo de nopal, se han podido fabricar pinturas que actúan como impermeabilizante, las cuales pueden ser aplicadas a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos. El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. Estos morteros tienen además una alta resistencia mecánica, una protección impermeable creciente, y características antihongos (Torres *et al*, 2010a).

La investigación realizada por Torres *et al* (2010a), relaciona únicamente los morteros de cal adicionándole goma de nopal, de cuyos resultados, surge la

inquietud de utilizar la fibra deshidratada de nopal como adición y sustitución en pastas de cemento, mortero y concreto, la cual aún no había sido estudiada.

De acuerdo Torres *et al* (2010b), derivado de los resultados preliminares, se sugiere que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado.

2.7.1.4 Fibra de nopal utilizada en la investigación

La fibra de nopal, utilizada en la investigación, es un producto obtenido de manera comercial, distribuido como producto alimenticio para el consumo humano.

El procedimiento de empleo será como sustitución de la masa total de cemento, con 0.5% y 1.5% de cactus opuntia en estado deshidratado en forma de polvo, esto para dar seguimiento a lo sugerido por Torres *et al* (2010b).

2.7.2 Fécula de Maíz o Almidón

El almidón o fécula de maíz es un polisacárido que se obtiene de moler diferentes variedades del maíz. Este producto forma parte de los carbohidratos que se ingieren de manera habitual a través de los alimentos. Su composición natural se presenta como partículas complejas que, en presencia de agua, forman una suspensión de poca viscosidad.

El principal componente son polímeros distintos de glucosa, aunque puede haber otros componentes presentes en menor cantidad.

Por lo regular, el almidón de maíz suele utilizarse como agente espesante en diferentes procedimientos, sin embargo, sus usos son más variados (Jacobo, 2014).

De acuerdo a Calafell (2018), la fécula de maíz cuenta con diversas características como son:

- **Gelatinización:** Durante la gelatinización o formación de gel o mucílago, se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más finos los que primero gelatinizan.
- **Retrogradación:** Se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y reaccionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos.
- **Gelificación:** La amilosa es esencialmente lineal, formando una red tridimensional cuando se asocian las moléculas al enfriarse y es la responsable de la gelificación de las pastas de almidón

2.7.2.1 Antecedentes

De acuerdo a los apuntes de Calvo (2022), el almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, y la principal fuente de calorías de la mayoría de la humanidad. Es importante como constituyente de los alimentos en los que está presente, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo el comportamiento del almidón.

Además, el almidón, aislado, es un material importante en diversas industrias, entre ellas la alimentaria. La técnica para su preparación se conocía ya en el antiguo Egipto, y está descrita por diversos autores clásicos romanos. En esas épocas se utilizaba especialmente para dar resistencia al papiro, y como apresto de tejidos. Actualmente la industria alimentaria es un gran consumidor, al ser el más barato de los materiales gelificantes.

A nivel mundial, son importantes fuentes de almidón el maíz, trigo, papa y mandioca. A escala local, o para aplicaciones especiales, se obtiene también almidón de la cebada, avena, centeno, sorgo, sagú, guisante, batata y arrurruz. El almidón más importante desde el punto de vista industrial es el de maíz.

2.7.2.2 Tipos y usos del almidón dentro de la construcción

Los almidones comerciales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente del maíz, el trigo, el arroz y de algunas raíces y tubérculos como la papa, yuca o mandioca.

Uno de los principales almidones es la denominada “fécula de maíz”, la cual proviene de los cereales, granos y harinas; es reconocida como una fuente rica en carbohidratos, y físicamente se presenta en forma de pequeños gránulos, los cuales son relativamente densos e insolubles y sólo se hidratan de manera adecuada en agua muy fría. Comercialmente se identifica como harina fina de maíz, almidón de maíz o maicena.

En lo que respecta el uso del almidón dentro de la construcción, se han identificado la realización de trabajos de investigación enfocados hacia el efecto de almidones y sus derivados en materiales con base cemento, ya que el almidón puede actuar como aditivo modificador de la reología.

Los almidones como aditivos han actuado como espesantes y como reductores de agua. El uso de almidones como reductores de agua podría ser de especial interés, dado que son biodegradables y pueden ser incorporados en las mezclas en lugar de condensados de formaldehído-sulfonato de naftaleno (FDN) o plastificantes tipo policarboxilato (PC). La adición de almidones contribuiría, por lo tanto, a reducir los problemas medioambientales (Izaguirre *et al*, 2010).

Izaguirre *et al* (2010), identificaron que el peso molecular de un almidón o de alguno de sus derivados parece ser determinante para su comportamiento: polímeros de

alto peso molecular tienden a aglomerarse y a producir un efecto espesante en los morteros, mientras que derivados de bajo peso molecular pueden ser fácilmente adsorbidos sobre la superficie de las partículas de conglomerante, dando lugar a repulsiones estéricas (esto es, un efecto dispersante) que conduce a viscosidades más bajas.

Teniendo como base la similitud entre almidones y derivados celulósicos se han dilucidado y ensayado diversos efectos de los almidones, cuyo resumen realizado por Izaguirre *et al* (2010), se muestra a continuación:

- a) Comportamiento espesante, que permite la utilización de almidones como aditivos mejoradores de la viscosidad.
- b) Estrechamente relacionado, se tiene un efecto retenedor de agua, debido a que estos aditivos —con grupos funcionales hidrofílicos— son capaces de fijar agua en su estructura, reduciendo la cantidad de agua libre en la mezcla y produciendo un incremento en la viscosidad. Además, las cadenas laterales de estas moléculas pueden interactuar entre sí, contribuyendo a ulteriores aumentos de la viscosidad.
- c) Capacidad retardadora del fraguado, aunque el mecanismo de acción de este proceso hasta el momento no se ha aclarado completamente.
- d) Un efecto dispersante sobre las partículas de cemento, y comportamiento como plastificante. En ese sentido, se han señalado muchas ventajas relativas al uso de éteres de almidón como reductores de agua (en lugar de FDN o plastificantes tipo policarboxilato): reducción de problemas medioambientales, acción reductora de agua más intensa ya que el principal mecanismo de dispersión es una fuerte repulsión estérica, y mejores propiedades reológicas de las pastas de cemento.

2.7.2.3 Fécula de maíz utilizada en la investigación

El almidón o fécula de maíz que se utilizó en esta investigación tiene la característica de ser un grano alimenticio para humanos, empleando un porcentaje de sustitución del 2%, e incorporándole fibra de nopal en un porcentaje de 0.5% respecto al cementante.

Jacobo (2014), realizó estudios con mezclas de concreto con un 2% de adición almidón o fécula de maíz con respecto al cementante, en donde menciona que los resultados más favorables comparados con una mezcla testigo de concreto, son en pruebas de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica.

3. Metodología

En la presente investigación, se pretende evaluar el comportamiento del concreto con la adición de fibra de cactus *Opuntia* o fibra de nopal (FN) y el almidón (fécula de maíz, MZ) como sustitutos de la masa total de cemento Portland en la elaboración de morteros, tiene como objetivo mejorar las propiedades físico – mecánicas, reducir la cantidad de cemento empleado y prevenir la acción de mecanismos que deterioran al concreto en ambientes extremos en su mayoría.

Para ello se diseñaron 3 mezclas de mortero, de acuerdo a la norma ASTM C109/C109M-20, con una relación agua-cemento igual a 0.68 e incorporando un aditivo superplastificante para alcanzar de manera óptima la trabajabilidad de la mezcla; siendo un mortero control (cemento-arena-agua); y dos mezclas con sustitución parcial de fibra de nopal (FN) 0.5% y 1.5% respectivamente, y una mezcla de 2% de almidón con 0.5% de fibra de nopal (MZ 2% - FN 0.5%).

3.1 Control de calidad de los materiales

El propósito de estudiar a fondo las propiedades de los materiales es el de encontrar las proporciones óptimas de posibles adiciones para obtener un mejoramiento en las propiedades físicas y mecánicas, y su cumplimiento dentro de los estándares normativos, para obtener un producto final con un alto criterio de durabilidad.

3.1.1 Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los morteros

3.1.1.1 Densidad del cemento

El peso específico del cemento (densidad, peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria) se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas.

El peso específico del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m³. El cemento portland de alto horno y el portland puzolánico, tienen pesos específicos que varían de 2.90 hasta 3.15, con promedio de 3.05 Mg/m³.

La densidad del cemento desempeña un papel significativo en su producción y funcionamiento. Los minerales crudos se calientan en hornos enormes para promover cambios químicos en éstos. De este proceso se obtiene lo que comúnmente es llamado “Clínker”.

El análisis de la densidad aparente del cemento se realiza a una muestra representativa del cemento a emplear en el diseño de la mezcla de concreto/mortero tal y como se obtiene después de la fabricación y comercialización del cemento.

3.1.1.2 Consistencia del material cementante

La consistencia es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 26 y 33%.

La consistencia del cemento se mide por medio del aparato de Vicat, en donde tal propiedad del cemento resulta como la cantidad de agua necesaria que requiere una pasta de cemento para presentar una penetración de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, bajo la superficie libre, empleando una aguja de 1 cm de diámetro y un molde para colocar tal pasta, en un tiempo de 30 segundos después de haber iniciado la prueba (NMX-C-057-ONNCCE-2015 y su equivalente ASTM-C-187-04).

Una vez obtenida la cantidad de agua necesaria en la pasta de cemento, se efectuará la combinación de una determinada masa de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

En la presente investigación el método de prueba se repite para las distintas mezclas de cementante, agregando la sustitución parcial de material orgánico correspondiente, hasta lograr los porcentajes deseados de consistencia normal para determinar posteriormente los tiempos de fraguado.

3.1.1.3 Fraguado del material cementante

Es el término utilizado para describir la rigidez de la mezcla del cemento. En general, el fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento fraguada. En la práctica, se utilizan los términos de fraguado inicial y fraguado final para describir etapas de fraguado elegidas arbitrariamente (Neville & Brooks, 1999).

El fraguado inicial se define como el tiempo que transcurre desde que la mezcla plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado (NMX-C-414-ONNCCE-2017).

El fraguado final es el tiempo que transcurre hasta que la mezcla de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya está dura.

Para la determinación del fraguado inicial como final del cemento hidráulico se realiza la prueba de tiempos de fraguado mediante las agujas de Gillmore, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-266-13.

3.1.2 Material pétreo: Arena

Los ensayos a desarrollarse para conocer las características principales de la arena están regidos por una serie de normas tanto mexicanas como extranjeras. En la Tabla 3.1 se muestra un resumen.

Tabla 3.1 Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos

PRUEBA DE LABORATORIO	NORMA NMX	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-03	ASTM-D-2419-02

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.1 Cuarteo del agregado pétreo

El cuarteo es un procedimiento para reducir la muestra de agregados obtenida en el campo al tamaño requerido para las pruebas y que permita conservar su representatividad.

El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio (NMX-C-030-ONNCCE-2004). Para realizar el cuarteo o reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, existen tres técnicas distintas.

3.1.2.2 Humedad actual en arenas

La normativa define a la humedad actual como la cantidad total de agua que contiene la muestra de agregado, al momento de efectuar la determinación de su

masa, para dosificar una revoltura, puede estar constituida por la suma del agua superficial y la absorbida (NMX-C-166-ONNCCE-2018).

El objetivo de realizar este análisis, es el de determinar el porcentaje de humedad que contiene el agregado en el momento de utilizarlo para la elaboración de una mezcla y así poder realizar la corrección correspondiente por humedad.

3.1.2.3 Humedad de absorción en arenas

La absorción en arenas se define como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como porcentaje de la masa seca y es índice de la porosidad del material (NMX-C-165-ONNCCE-2014).

El ensayo consiste, en encontrar la pérdida de masa de una muestra de agregado sometida a secado en una bandeja colocada sobre una fuente de calor, cuyo resultado se expresada en porcentaje.

3.1.2.4 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)

Se le considera masa volumétrica de los agregados, a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE-2004).

El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural. Dicho ensayo se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004.

3.1.2.5 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV)

la determinación de la masa volumétrica seca y varillada se realiza a partir de una determinada compactación (varillada) del agregado fino, dentro del mismo recipiente que se empleó para determinar la masa volumétrica seca y suelta anteriormente.

La prueba se rige por la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 y aplica a agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 40 mm o menor.

3.1.2.6 Granulometría en el agregado fino (arena)

Los agregados finos son principalmente arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores a 5 mm. Estos agregados deben cumplir ciertas especificaciones para su uso en la ingeniería, tales como: ser las partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, de

recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

En el agregado fino hay dos elementos de máxima importancia y los cuales deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por otro lado la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finura aceptables (entre 1.9 y 3.5) pero carecer de algún tamaño granulométrico (Colín, 2016). En la práctica cada fracción contiene partículas que se encuentran dentro de límites especificados, que son las aberturas de los tamices normales del muestreo.

El análisis granulométrico consiste en pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

La Figura 3.1 presenta los límites granulométricos para agregado fino para mezclas de concreto y mortero.

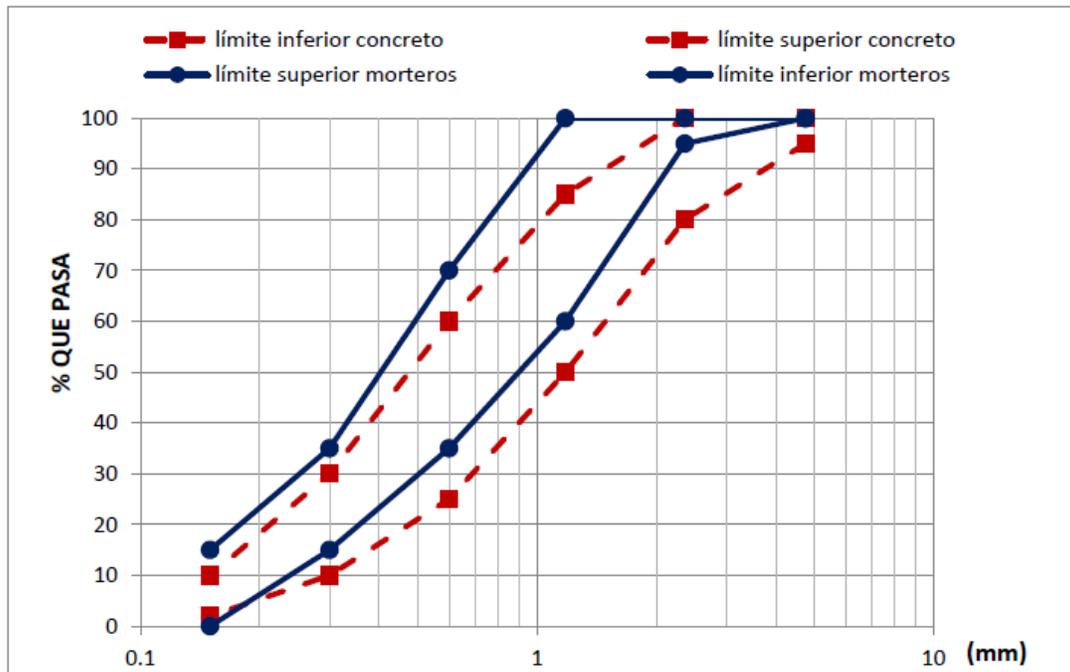


Figura 3.1 Límites de granulometría para morteros y concreto

Fuente: NMX-C-111-ONNCCE-2014

Para fines de calidad se recomienda que el módulo de finura esté entre 2.5 y 3.0. De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014, el rango módulo de finura puede estar entre 2.3 y 3.2.

3.1.2.7 Colorimetría en arenas

Existen tres amplias categorías de sustancias perjudiciales que pueden encontrarse en los agregados: impurezas orgánicas, que interfieren en el proceso de hidratación

del cemento; recubrimientos, que impiden el desarrollo de una buena adherencia entre el agregado y la pasta del cemento; y algunas partículas individuales que son en sí mismas débiles o inestables.

El ensayo de colorimetría consiste en determinar el contenido de material orgánico en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

Los agregados después de efectuar el ensayo de impurezas orgánicas, que se observen con un color más oscuro que la coloración No. 3, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes, o bien, si se demuestra que el efecto de las impurezas orgánicas en morteros ensayados a la edad de 7 días, dan resistencias calculadas no menores que el 95% conforme al método que establece la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014.

3.1.2.8 Sedimentación en arenas

El objetivo de este ensayo es el de determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no, para la elaboración de concreto.

Esta prueba no está referenciada con alguna norma, por lo tanto, es sólo una prueba complementaria para conocer el contenido de finos del agregado pétreo fino, esto como control de calidad (Navarro *et al*, 2011).

3.1.2.9 Material que pasa por la malla No. 200

La norma NMX-C-084-ONNCCE, 2018 especifica que el ensayo para determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, consiste en lavar por agitación la muestra, separando el agua que contienen los materiales disueltos y en suspensión por decantación, pasándola por la criba 0,075 mm (No. 200).

La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como porcentaje de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje del material más fino que la criba 0,075 mm (No.200) obtenida por lavado.

3.1.2.10 Terrones de arcilla

La arcilla puede estar presente en el agregado en forma de recubrimiento superficial la cual puede interferir en la adherencia entre el agregado y la mezcla de agua-cemento. La adherencia es primordial para obtener una resistencia satisfactoria y una buena durabilidad del concreto, es por ello que el problema que representan los recubrimientos de arcilla en el agregado es muy importante (Neville & Brooks, 1999).

Las arcillas en los agregados son partículas de baja resistencia estructural, y que al entrar en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, principalmente cuando su volumen es considerable.

La normativa menciona que el objetivo del ensayo de terrones de arcilla es el de conocer la cantidad aproximada de estos, así como de partículas deleznable que

contiene el agregado natural, conocido comúnmente como arena (NMX-C-071-ONNCCE-2004).

3.1.2.11 Densidad de la arena

La densidad de un material es numéricamente igual a su peso específico y se expresa en kilogramos por metro cúbico.

El ensayo para conocer la densidad de una arena, es la obtención del volumen de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra. El resultado es muy útil para realizar el proporcionamiento de mezclas de concreto o mortero.

Para realizar el ensayo se hace uso de la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014.

3.1.2.12 Equivalente de arena

La normativa mexicana NMX-C-480-ONNCCE-2014, define al equivalente de arena como la proporción volumétrica de material no plástico (arena y limo) en una muestra de material que pase por la malla 4.75 mm (No. 4).

La prueba consiste en determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

3.1.3 Agua

El agua potable del laboratorio cuenta con un reporte de calidad del agua, realizado por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el cual avala el cumplimiento de la normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004.

3.1.4 Aditivo

El aditivo utilizado se distribuye comercialmente en polvo, es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que provocan la atracción entre ellas. Su principal efecto en la mezcla del concreto es que esta fluya más fácilmente que una mezcla convencional. Este efecto se denomina plastificación.

Además, el aditivo permite reducir la relación agua-cemento sin pérdida en el revenimiento. Esto resulta directamente en un incremento de la resistencia inicial y final a la compresión del concreto.

Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150° C. Su temperatura de descomposición es a los 380° C. La tabla 3.2 presenta la dosificación recomendada por el fabricante.

Tabla 3.2 Dosificación del aditivo en polvo para una mezcla de concreto

Agregados	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	445	445	445	379
Arena	796	867	914	972
Grava	920	920	920	920
Agua	206	170	155	158
Aditivo	-	1.8	3.3	2.8
Revenimiento (cm)	11.5	10.2	12.7	10.8
% RH	-	18.18	25.3	24
% RC	-	-	-	14.8
Relación a/c	0.46	0.38	0.34	0.41

Fuente: Christianson, S.A. de C.V

3.2 Control de calidad del mortero fresco

Una vez definida la evaluación de los materiales, el cemento y agregados, y previo a la elaboración de los especímenes se realizaron pruebas al mortero fresco, teniendo como objetivo encontrar a través de “tanteos” la cantidad de agua y aditivo necesaria para tener una buena trabajabilidad en la mezcla.

3.2.1 Fluidez

El ensayo para determinar la cantidad de agua necesaria para que la mezcla de mortero adquiriera la trabajabilidad adecuada, es conocido como prueba de fluidez, dicha prueba consiste en que la mezcla logre una fluidez de $110 \pm 5\%$ en la mesa de fluidez, de acuerdo a la normativa NMX-C-061-ONNCCE-2015, NMX-C-144-ONNCCE-2015, y su equivalente ASTM C109/C109M.

Cuando se habla de trabajabilidad en la mezcla de mortero, se refiere a que la mezcla debe garantizar un buen comportamiento al momento de mezclarse, incluyendo propiedades de manejabilidad, plasticidad y ductilidad; evitando fenómenos como la exudación y segregación.

3.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH)

El ensayo para la obtención del “potencial de Hidrógeno” (pH) en el mortero en estado fresco, se realizó con ayuda de tiras indicadoras del nivel de pH.

El objetivo de colocar las tiras de papel en la mezcla fresca, es el de saber por medio de estas, si la mezcla se encuentra en un estado alcalino, siendo este una característica más evaluada en la mezcla en estudio.

3.2.3 Temperatura

La temperatura de una mezcla en estado fresco debe aproximarse a la temperatura ambiente que se encuentra a la hora de realizar dicha mezcla. Para la obtención de datos precisos de las temperaturas en cada una de las mezclas en estudio se realizaron lecturas por medio de un termómetro infrarrojo, el cual arroja un valor de temperatura sin afectar la mezcla después de elaborarla, de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

3.2.4 Elaboración de especímenes

Una vez determinada las cantidades de los materiales que componen a las mezclas de mortero, se elaboraron las mismas. La relación agua-cemento resultante de la prueba de fluidez fue de 0.68; dicha relación se logró al realizar la mezcla testigo (cemento portland, agua y arena), a la cual se le agregó agua hasta que alcanzara la fluidez de $110 \pm 5\%$, ya lograda la fluidez se calculó la relación agua-cemento de dicha mezcla y se fijó esta relación para todas las mezclas para los diferentes aditivos en estudio.

Las mezclas que se realizaron a partir de la relación agua-cemento determinada fueron cuatro, con cantidades distintas tanto de sustitución con material orgánico como de aditivo (Véase Tabla 3.3), cumpliendo todas estas con la prueba de fluidez.

Tabla 3.3 Dosificación de las mezclas en estudio

CONTENIDO DE LA MEZCLA	CANTIDAD POR MEZCLA			
	TESTIGO (T10)	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2% FN 0.5%
Cemento (CPC 30R-RS)	1000 gr	995 gr	985 gr	975 gr
Arena	2750 gr	2750 gr	2750 gr	2750 gr
Agua	680 ml	680 ml	680 ml	680 ml
Aditivo	-	3 gr	5.5 gr	5.6 gr
Relación agua/cemento (A/C)	0.68	0.68	0.68	0.68
Fibra de cactus Opuntia (FN)	-	5 gr	15 gr	5 gr
Fécula de Maíz (MZ)	-	-	-	20 gr

Fuente: Elaboración propia

Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de prueba para las 4 edades: 120, 150, 180 y 300 días.

La norma correspondiente para la elaboración de especímenes menciona que “los moldes y los accesorios para elaborar los especímenes de concreto deben ser de acero, hierro fundido, o de cualquier otro material no absorbente y no reactivo con el cemento Portland u otros cementantes hidráulicos. Los moldes deben cumplir con las dimensiones y tolerancias que se especifican en la norma y deben mantener las dimensiones y sus formas bajo condiciones de trabajo severas. Deben ser no permeables durante su empleo y estar provistos de los elementos necesarios para fijarlos firmemente en sus bases.

3.2.4.1 Cubos de 5 x 5 x 5 cm

En la elaboración de los cubos de mortero, con y sin las distintas sustituciones, se optó por apegarse a la normativa vigente. Dicha normativa hace mención en cuanto a las dimensiones especificadas de los moldes y para la elaboración de los mismos, mediante un procedimiento repetitivo por la cantidad de cubos que demandaba la experimentación hacia los mismos (NMX-C-159-ONNCCE-2016 y/o ASTM C109/C109M).

Los moldes que se utilizaron son de un material de acero inoxidable y bronce con dimensiones estándar de 5 cm de arista, fijados a la placa de base con soldadura y unidas las cuatro caras del cubo con una bisagra ubicada en una de las aristas del cubo y realizando el cerramiento con un clavo o tachuela para no permitir la salida de la mezcla al realizar el colado del mortero.

3.2.4.2 Briquetas

Para la fabricación de las briquetas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos. Debido a que no existe una norma específica para el llenado de los moldes de briquetas.

El molde que se utilizó para la fabricación de las briquetas, cuya forma parece la de un cacahuate, es de bronce, fijado en uno de sus extremos por una bisagra quedando del lado contrario una paloma de acero para realizar el cierre del molde.

3.2.4.3 Cilindros de 5 cm Ø x 10 cm de altura

En lo que respecta a la fabricación de especímenes cilíndricos, los moldes para adquirir la mezcla de mortero la forma de un cilindro, deben cumplir con las características que dicta la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2016, la cual señala que deben ser de lámina gruesa o cualquier material no absorbente, el plano definido por el borde del cilindro debe ser perpendicular a su eje; las dimensiones no deben variar en más de 1% de su diámetro y 1% de su altura de acuerdo a las dimensiones especificadas, respetando la relación 1:2 (diámetro: altura), deben estar provistos de una base maquinada metálica con planos lisos y con elementos para sujetarlas firmemente al molde con su plano perpendicular al eje del molde.

3.2.4.4 Prismas de 4 x 4 x 16 cm

La norma correspondiente para la fabricación de prismas de mortero menciona que los moldes deben ser de acero inoxidable y que sus dimensiones estándar serán de 4cm x 4cm x 16cm (ASTM-C-348). Los moldes que se emplearon en la elaboración de los especímenes prismáticos se conformaban de dos primas por molde en donde los divide una placa fija central (siendo esta la cara longitudinal del prisma) y que de igual manera se unen dos de sus caras por una bisagra, teniendo su cerramiento en el lado opuesto.

3.2.4.5 Losas de 1 m² para adherencia

Uno de los usos que se les dan a los morteros es el revestimiento de elementos estructurales, de esta manera su resistencia mecánica debe ser capaz de responder a las tensiones provocadas por pequeños movimientos diferenciales del soporte, así como a las tensiones generadas por cambios ambientales e impactos o agresiones externas.

Los morteros deben ser capaces de soportar dos tipos de resistencias, compresión y tracción. La resistencia a la compresión nos proporciona una idea de la cohesión interna del mortero, indicando así, su capacidad de soportar presiones sin disgregarse, mientras que la resistencia a la tracción nos proporciona información sobre la dificultad que oponen las partículas a separarse.

La adherencia es una característica propia de los morteros para adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (concreto, piedra, ladrillos, acero, etc.).

Para esta investigación se realizó un estudio para determinar la resistencia a la adherencia que alcanzan los morteros base cemento a los 120 y 180 días. Para ello se prepararon las cuatro mezclas en estudio con la misma relación agua-cemento utilizada para la elaboración de los especímenes de prueba descritos anteriormente.

Para la realización de los especímenes y las pruebas se hizo uso de la norma ASTM C1583/C1583M-20.

3.2.4.5.1 Colocación de pastas de mortero en estudio para la prueba de adherencia

Una vez cumplidos los 28 días de elaboración y curado de las losas de 1m² se procedió a la elaboración de las pastas, con su respectiva sustitución de material orgánico, y después colocarlas en la superficie de la losa como revestimiento.

Las pastas de mortero que se elaboraron para la realización de la prueba de adherencia de acuerdo a la norma ASTM C1583/C1583M-20.

3.2.4.6 Cuantificación de los especímenes elaborados

Al terminar cada uno de los procesos descritos para la elaboración de los especímenes, se procedió a cuantificar el total de especímenes elaborados para cada edad de las pruebas de durabilidad y físico-mecánicas establecidas al principio de la investigación, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Número de especímenes requeridos por cada tipo de mortero en estudio

TIPO DE ESPÉCIMEN	PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS				PRUEBAS POR DURABILIDAD			CANTIDAD TOTAL DE ESPÉCIMENES
					FAGERLUND	POROSIDAD TOTAL	ATAQUE POR SULFATOS	
	EDAD (DÍAS)				EDAD (DÍAS)			
	120	150	180	300	90 y 180			
CUBOS	5	5	5	5	10	6	36	72
BRIQUETAS	5	5	5	5	-	-	-	20
PRISMAS 4 x 4 x 16 cm	5	5	5	5	-	-	-	20
CILINDROS 5 x 10 cm	5	5	5	5	-	-	-	20

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.7 Curado de los especímenes

De acuerdo a lo establecido en la normativa mexicana NMX-C-148-ONNCCE- 2010, el almacenaje inicial corresponde al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco.

Los especímenes fueron colocados en un sitio donde su temperatura habitual es húmeda, para garantizar que cada uno de los especímenes de morteros no perdieran agua durante su fraguado, observándose solo la pérdida de agua durante su elaboración.

La remoción de los moldes debe efectuarse en no menos de 20 horas, ni más de 48 horas, luego de ser elaborado el elemento, para posteriormente almacenarlo en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ desde el momento del desmolde hasta el día en que se le realizaran las pruebas correspondientes.

Para controlar la temperatura marcada en la normativa para su curado, todos los especímenes fueron sumergidos en agua en recipientes limpios de 19 litros, con un monitoreo constante del tirante de agua y de la temperatura para cumplir con las especificaciones de la norma hasta el día de la prueba.

3.3 Control de calidad en los ensayos en el mortero endurecido

Para conocer las características particulares de los morteros en estado endurecido existen dos metodologías distintas de aplicación, por un lado, se encuentran las

pruebas no destructivas, las cuales arrojan resultados sobre propiedades del mortero en estudio sin alterar su composición química ni física; y por otro lado están las pruebas destructivas en donde el objetivo es conocer parámetros que ayuden a tener como resultado las características del mortero endurecido hasta su nivel límite de falla.

Las 4 mezclas en estudio, como lo son el mortero Testigo (T10) y los morteros con sustitución de fibra de nopal (FN 0.5% y FN 1.5%), y almidón y de fibra de nopal (MZ 2% FN 0.5%), fueron ensayadas tanto en pruebas destructivas como en no destructivas a edades de curado (120, 150, 180 y 300 días).

3.3.1 Pruebas no destructivas

Las pruebas no destructivas (PND) son aquellas que se realizan sobre el espécimen de forma directa teniendo un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada, lo cual nos permite repetir de forma sencilla dichas pruebas con los mismos especímenes.

Los resultados que arrojan las PND son de utilidad para conocer de forma aproximada la calidad de la mezcla de mortero, así como sus características físicas, mecánicas o químicas sin alterar de forma permanente sus propiedades; lo cual permite tener una idea clara de la composición y acomodo de los materiales en una muestra.

Las pruebas no destructivas realizadas en esta investigación fueron: densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica (RE) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), que además son no invasivas.

3.3.1.1 Densidad.

La prueba de densidad en morteros se realizó a 5 especímenes cúbicos por edad de prueba y por tipo de mezcla.

La metodología empleada para realizar dicho ensayo fue guiada con ayuda del manual de "Análisis de Materiales (Navarro *et al*, 2011).

3.3.1.2 Gravedad específica (densidad relativa)

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad de un elemento y dependerá de la concentración de masa por unidad de volumen de cada elemento.

El ensayo para conocer la gravedad específica en los morteros del estudio se realizó en 5 especímenes cúbicos y en 5 especímenes cilíndricos, con ayuda del manual de "Análisis de Materiales" (Navarro *et al*, 2011) y de la normativa mexicana correspondiente NMX-C-263-ONNCCE-2010.

3.3.1.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (RE) se define como una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad, su unidad de medida es el “ohm-cm” u “ohm-m”. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (Red DURAR, 2000).

El ensayo de resistividad eléctrica fue realizado a los especímenes de la investigación (cubos, prismas y cilindros), según lo indicado en la norma ASTM G57-20.

3.3.1.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico es una prueba no destructiva conocida desde hace mucho tiempo y se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (Red DURAR, 2000).

Este tipo de ensayo no destructivo que se lleva a cabo en las muestras de morteros, es aplicable para la verificación de la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa); para detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones, y para el monitoreo de las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

La prueba para conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica, se realizó a 5 especímenes de forma cúbica, cilíndrica y prismática al final de todas las pruebas no destructivas anteriormente descritas. El ensayo se llevó a cabo mediante un equipo de sistema digital para ensayos ultrasónicos.

3.3.1.5 Módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de Frecuencias de resonancia fundamentales transversales en especímenes de mortero

El módulo de elasticidad de un concreto es un aspecto fundamental a considerar, depende directamente de su resistencia a la compresión, por lo que los concretos de alta resistencia poseen módulos mayores que aquellos concretos de baja resistencia.

Cuando los especímenes se encuentran sujetos a fuerzas de compresión, estas producen deformaciones en el concreto, y a partir de esta relación se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación unitaria, de donde se puede obtener el módulo de elasticidad estático.

Los métodos habituales que se realizan en laboratorio para determinar dicho módulo se basan en ensayos estáticos que permiten medir con precisión tensiones y deformaciones, o en la aplicación de ondas acústicas que determinan el módulo dinámico de una forma simple y económica (Rosell & Cantalapiedra, 2010).

Los ensayos no destructivos basados en la aplicación de ondas acústicas evitan el rompimiento del material o de las probetas confeccionadas para su estudio, proporcionando un conjunto de resultados interesantes, que pueden ser utilizados para la estimación de otros parámetros del material.

El método de prueba empleado para la determinación del módulo de elasticidad dinámico en los morteros en estudio, fue a partir de la frecuencia de resonancia de manera transversal en prismas con dimensiones de 6 cm de arista en su cara transversal y de 26 cm en su lado longitudinal, obteniendo así en cada espécimen además del módulo de elasticidad dinámico, el valor dinámico de Poisson.

3.3.2 Pruebas destructivas

Las pruebas destructivas que se realizan al concreto o mortero endurecido tienen como objetivo evaluar el cumplimiento de las especificaciones establecidas en la normativa sobre las propiedades físico-mecánicas, a través de ensayos de laboratorio que, a partir del daño ocasionado en el espécimen, ya no son aptas para realizar una segunda prueba de igual magnitud.

Los ensayos de esta índole son los que definirán de forma directa la resistencia mecánica del mortero o concreto en estudio.

Las pruebas destructivas que se le realizaron a las diferentes mezclas de mortero endurecido fueron: resistencia a la compresión simple, resistencia a flexión, resistencias a tensión directa e indirecta y resistencia a tensión por adherencia.

3.3.2.1 Resistencia a la compresión simple

La primera prueba destructiva realizada en esta investigación, es la de compresión simple en cubos de 5 cm de arista y cuyo valor arrojado puede ser considerado como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad como de la capacidad de resistencia mecánica.

La resistencia a compresión se define como la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto hidráulico o mortero, cuyo valor se obtendrá mediante especímenes cúbicos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresada en kg/cm^2 .

Para el análisis de la resistencia a carga axial de las mezclas en estado endurecido se siguió el procedimiento de las normas vigentes NMX-C-061-ONNCCE-2015 o su equivalente ASTM C109/C109M-20, las cuales especifican la elaboración de cubos de mortero de 5cm por lado constituidos por una parte del cementante y 2.75 de arena graduada.

De la prueba realizada para la presente investigación se utilizaron 5 especímenes por cada edad de prueba, es decir 20 cubos en total para las edades de 120, 150, 180 y 300 días; y para cada una de las mezclas que se elaboraron como lo son las dos sustituciones de fibra de nopal (FN 0.5% y FN 1.5%), la combinación de almidón con fibra de nopal (MZ 2% FN 0.5%) y el mortero testigo (T10) sin sustituciones.

3.3.2.2 Resistencia a la tensión por flexión en prismas

Según la norma NMX-C-303-ONNCCE-2010, el ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto hidráulico, se realiza mediante el uso de una viga libremente apoyada con carga en el centro del claro.

Para conocer el comportamiento del mortero en estudio (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada), el ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM C348-21; la cual establece que para conocer los esfuerzos de flexión se utilizaran prismas de 40 x 40 x 160 mm.

Antes de realizar la prueba para determinar la resistencia a la flexión, se debe tener en cuenta la definición del módulo de ruptura, el cual de acuerdo a la normativa es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga.

El número de prismas que se utilizó por edad de prueba y tipo de mezcla fue de 5 especímenes, con la finalidad de encontrar un promedio final para el valor correspondiente a tal resistencia.

3.3.2.3 Resistencia a la tensión directa en briquetas

La resistencia a la tensión consiste es la máxima fuerza o tensión a la que puede someterse un material antes de su rotura.

Este ensayo de esfuerzo de tensión en morteros, se considera un método primario opcional, previo a la realización de otros ensayos. La normativa de referencia es la ASTM C190.

Este ensayo se realiza mediante la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaellis, dicha prueba para la resistencia a la tensión directa, se realizó en 5 especímenes en forma de “cacahuate” conocidas como briquetas, a la edad correspondiente por cada mezcla de estudio.

3.3.2.4 Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de mortero

Para conocer la carga máxima que soporta un mortero a tensión y así conocer su resistencia a la tensión de forma indirecta, existe una prueba, en la cual se someten cilindros de mortero en su eje longitudinal, realizando una tensión indirecta en su estructura. El ensayo para estudiar cada tipo de mezcla se realizó de acuerdo al día de curado correspondiente en 5 especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro por 10 cm de largo y cuyo procedimiento se realizó de acuerdo al manual de "Análisis de Materiales (Navarro *et al*, 2011).

3.3.2.5 Resistencia a la tensión por adherencia

La adherencia en materiales que se emplean para revestir cualquier tipo de estructura de mampostería, es una característica propia de los morteros cuya propiedad radica en adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (piedra, concreto, ladrillos, acero, etc.). Dentro del área de construcción es conocida como una propiedad fundamental que deben cumplir los morteros.

El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla. La prueba física que se le realizó a los diferentes morteros en estudio, para conocer la resistencia a la tensión e identificar el tipo de falla, es conocida como la prueba *Pull-Off* (ASTM C1857/C1857M-19).

Las pruebas de adherencia se realizaron a partir de que se alcanzaron las diferentes edades de prueba de las pastas de mortero, siendo estas las que se colocaron una vez que las losas de concreto llegaron a su resistencia máxima a los 28 días. Se realizaron 5 perforaciones por cada mezcla en estudio y por cada edad correspondiente de prueba.

3.3.3 Pruebas por durabilidad en el mortero

Se define como durabilidad a la capacidad del concreto hidráulico o mortero para uso estructural de resistir durante un tiempo determinado (vida útil) la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro, manteniendo su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.

De acuerdo a lo que especifica la normativa, las estructuras de concreto se deben diseñar y construir con el propósito de cumplir los requisitos de funcionalidad y durabilidad, es decir, sin causar gastos extraordinarios debidos a mantenimientos y reparaciones, considerando su integridad y capacidad durante su vida útil. La vida útil se incluye implícitamente en el diseño y en los diferentes reglamentos de construcción, sin embargo, en la práctica en ningún caso se establece de manera explícita.

En el caso del mortero se dice que es durable cuando este puede resistir en forma satisfactoria las condiciones de servicio a las que estará sujeto y para las cuales fue diseñado. La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesto el mortero, o a causas internas del mismo. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataques por líquidos y gases de origen natural o industrial. El grado de deterioro producido por estos agentes dependerá principalmente de la calidad del mortero, aunque en condiciones extremas cualquier mortero mal protegido se daña. Las causas internas son: la reacción álcali-agregado, cambios de volumen debidos a diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento y sobre todo de la permeabilidad del mortero, este factor determina en gran medida la vulnerabilidad del mortero ante agentes externos y por ello un mortero durable debe ser relativamente impermeable (Rivera, 2016).

En la tabla 3.5 se integraron los distintos ensayos de durabilidad, de acuerdo a los distintos tipos de exposición a las cuales pueden estar sujetos los morteros en estudios colocados en una estructura en ambientes agresivos.

Tabla 3.4 Normas de referencia para los ensayos de durabilidad

ENSAYO	REFERENCIA	
	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la solidez del mortero por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.	NMX-C-075-ONNCCE-2006	ASTM-C88-13
Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.	[Red DURAR, 2000]	
Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.	[Red DURAR, 2000]	
Método de prueba estándar para la determinación de la porosidad total en el mortero.	NMX-C-263-ONNCCE-2010	-
Método de prueba estándar para la determinación de permeabilidad de cloruros.	ASTM C1202-19	-
Método de prueba estándar para la determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.	NMX-C-205-ONNCCE-2005	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1 Ataque por sulfatos

Este método de ensayo está integrado por un procedimiento que permite estimar de manera preliminar la solidez de los agregados utilizados en una mezcla de concreto o mortero, cuando se somete a la intemperie.

El resultado se puede obtener mediante la inmersión repetida en soluciones saturadas de sodio o sulfato de magnesio, seguido por un secado en horno, para deshidratar parcial o totalmente la precipitada en los espacios de los poros permeables.

La prueba dentro del laboratorio simula, mediante solución preparada de sulfato de sodio, las condiciones de exposición a sales a las que se encuentran sometidos en la mayoría de los casos los elementos de revestimiento de concreto en ambientes marinos, los cuales sufren constantes cambios secado y humedecimiento provocando en primera instancia el deterioro prematuro del revestimiento y del concreto, para finalmente reducir la vida útil del elemento.

En todos estos ambientes agresivos y de climas extremos, algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática.

El mortero atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino y característico. El daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y descascaramientos progresivos que reducen el mortero a un estado frágil o incluso blando (Rivera, 2013).

La prueba de ataque por sulfatos se realizó aplicando el siguiente procedimiento a especímenes cúbicos de 5 cm de arista a dos edades de prueba como lo fueron a 90 y 180 días, y para cada una de las mezclas en estudio, de acuerdo a la norma NMX-C-075-ONNCCE-2006.

3.3.3.2 Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros

El ataque por cloruros en una estructura de concreto reforzado se distingue por la corrosión del acero de refuerzo, y es solo como consecuencia de esta corrosión que se daña el concreto circundante (Neville & Brooks, 1999).

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla (por ejemplo: áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al concreto, entre otros (Aguirre & Mejía, 2013).

La movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adicciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto (Aguirre & Mejía, 2013).

Una prueba rápida para la permeabilidad de los iones cloruro en el concreto es a través de la norma ASTM-C-1202-2019, la cual determina la conductancia eléctrica, expresada como la carga eléctrica total en coulombios (amperio-segundos) pasada durante un cierto intervalo de tiempo (6 horas) a través de un disco de mortero, en el caso de la presente investigación, entre soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio cuando se mantiene una diferencia de potencial 60V de c.d., polarizando las dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruros a penetrar en el mortero.

La prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido usada frecuentemente en la evaluación de la durabilidad en las estructuras de concreto, ya que se puede establecer, en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar concretos en cuanto a esta característica.

En la presente investigación se contemplaron dos edades de prueba para las distintas mezclas en estudio, las cuales fueron a 90 y 180 días de edad.

3.3.3.3 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados

Los efectos adversos producidos por congelamiento y deshielo son unos de los principales problemas para la durabilidad del concreto. El deterioro puede ser producido por la dilatación del agua de la pasta, la dilatación de algunas partículas del agregado o la combinación de ambas (Rivera, 2013).

Los ciclos de congelación y deshielo, son un detonante prematuro del concreto, debido la expansión del agua al congelarse, y a la contracción durante el deshielo. Las tensiones son provocadas por el aumento de volumen del agua al congelarse, este aumento de volumen es de aproximadamente el 10%, por lo que si el mortero tuviera un 10% de poros capilares con aire (saturación menor al 10%), al congelarse el agua ocuparía el vacío disponible, sin introducir tensiones perjudiciales en el material (Colín, 2016).

Para determinar la resistencia de la mezcla de mortero a ciclos de congelamiento y deshielo, el procedimiento de la prueba consiste en un congelamiento y deshielo rápido en agua, el cual no intenta proveer una medida cuantitativa de la vida de servicio que puede esperarse en un tipo de concreto en específico, sin embargo, si busca determinar los efectos de variaciones en ambas propiedades y condiciones del concreto en la resistencia al congelamiento y deshielo (ASTM-C666-97).

Se elaboraron 3 especímenes prismáticos de 6 cm x 6 cm x 26 cm en las cuatro mezclas distintas en estudio, y fueron ensayadas conforme los establece la norma NMX-C-205-ONNCCE-2005.

3.3.3.4 Estimación de la profundidad de carbonatación

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12-14) del concreto por efecto del CO₂ que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO₂ reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio), neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10 (Red DURAR, 2000).

El ensayo para estimar la carbonatación en elementos de concreto tiene como objetivo principal determinar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con una solución de indicador ácido-base.

El contenido de humedad relativa del ambiente influye de manera significativa para que se produzca la carbonatación con mayor rapidez en un intervalo del 50%–70% aproximadamente, ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono.

Los especímenes utilizados para la prueba fueron 5 especímenes en forma de prisma, los cuales se colocaron a la intemperie en dirección suroeste de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia (en el nivel de azotea del laboratorio) después de haber sido fallados en la prueba de flexión y probadas 3 mitades de las 10 existentes por cada edad de prueba, las cuales fueron a 90, 135 y 180 días.

3.3.3.5 Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero

La absorción capilar es considerada como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida a través de los capilares, cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Este parámetro representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales (Red DURAR, 2000).

La metodología de ensayo se basa en los experimentos de Fagerlünd (1982), y describe la cinética de la absorción capilar de concretos y morteros a través de tres coeficientes: resistencia a la penetración del agua (m) en s/m^2 , coeficiente de absorción capilar (k), y la porosidad efectiva (ϵ).

La prueba se realizó en especímenes cúbicos (5 cm x 5 cm x 5 cm), para cada mezcla en estudio, y a la edad de 90 y 180 días. El procedimiento efectuado aún no se encuentra normado, pero se partió de la referencia emitida por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Red DURAR, 2000).

Actualmente se encuentra con la normativa ASTM F2170-19a, cuyo método utiliza un termohigrómetro con sondas in situ, junto con una serie de orificios preparados, para obtener lecturas de la humedad relativa en la profundidad de la losa de concreto.

La verificación de la humedad relativa en la profundidad de la losa es importante en la determinación de la cantidad de humedad que la losa puede liberar en los materiales circundantes, para ayudar a prevenir (o al menos a anticipar) los problemas de humedad.

3.3.3.6 Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos)

Como parte de los ensayos de durabilidad, existe un ensayo de porosidad o porosidad total, el cual presenta criterios para conocer la calidad y durabilidad del concreto y del mortero, ya que en medida en que esta sea mayor o menor, los iones y agentes que degradan la matriz de cemento pueden avanzar más rápida o lentamente. El ensayo de porosidad determina la absorción capilar y la porosidad total en morteros y concretos como una medida de su compacidad.

Como porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de los concretos y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación.

De acuerdo a la Red DURAR (2000), los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

- **Poros de gel:** Son de menor tamaño ($< 15-25 \text{ \AA}$) y pertenecen a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros solo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades $< 20\%$.
- **Poros capilares:** Son de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a $1 \mu\text{m}$. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la mezcla de cemento endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad.
- **Poros de aire:** Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05 mm. Aunque afectan la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos beneficiosos

El ensayo aplicable para conocer la porosidad total de los morteros en estudio, fue una continuación de la prueba para conocer la absorción capilar en las muestras, teniendo como punto inicial la inmersión de las muestras desde la elaboración de estas hasta el día de prueba.

La Red DURAR (2020), en su manual relacionado a la durabilidad del concreto menciona, que para el ensayo de porosidad total, el espécimen, luego de un pre-acondicionamiento de secado a 105°C por 72 horas (o menos, hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador durante 24 horas, (aunque es más conveniente usar un secado a 50°C con el fin de no dañar el gel de cemento), se sumerge en agua totalmente durante 24 horas mínimo, al cabo de las cuales se

registra su masa fuera (saturado de agua) y dentro de agua (sumergido en agua). Esta última masa se registra con ayuda de una balanza hidrostática. Finalmente, el espécimen se seca a 105 °C hasta masa constante (que es cuando la variación entre dos ponderaciones sucesivas es menor de 0.05%) y se registra dicha masa.

Para la realización de esta prueba por cuestiones de practicidad, fueron realizadas conforme al procedimiento establecido en la norma NMX-C-263-ONNCCE-2010.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados y se realiza una interpretación de los mismos a manera de discusión. Adicionalmente se incluyen detalles de los ensayos realizados que no fueron incluidos en el capítulo 3.

Se consideró en esta investigación el estudio de 4 mezclas de morteros distintas incluyendo el mortero testigo para control. Para la identificación en esta publicación cada una de estas mezclas se denotará de la siguiente manera, de acuerdo a la sustitución parcial de material orgánico por cemento.

- **T10** = Mortero testigo o control con 100% de cemento.
- **FN 0.5%** = 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.
- **FN 1.5%** = 1.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.
- **MZ 2%-FN 0.5%** = 2% de Almidón o fécula de maíz y 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.

4.1 Propiedades físico-mecánicas de los morteros

En este apartado se presentarán los resultados de las evaluaciones realizadas a los diferentes materiales y a las mezclas de estudio.

4.1.1 Material cementante: Cemento y sustituciones de material orgánico

El primer paso fue evaluar las propiedades de cementante y de su compartimiento con las diferentes sustituciones de la investigación.

4.1.1.1 Densidad del cemento

El valor de la densidad del cemento obtenido en esta investigación se encuentra dentro del rango de valores que establece la norma NMX-C-152-ONNCCE-2015, cuyo resultado se muestran a continuación:

Tabla 4.1 Resultado de la densidad del cemento

Cemento utilizado	Densidad obtenida (g/cm ³)	Densidad por norma (Límites de aceptación)
CPC 30R RS	3.05	2.90 - 3.15

4.1.1.2 Consistencia del material cementante

Los resultados de la prueba de consistencia normal para cada mezcla del material cementante se muestran a continuación:

Tabla 4.2 Resultados de la consistencia normal del material cementante

Mezcla de material cementante		Consistencia Normal (%)	Valores frecuentes de consistencia normal (%)
Testigo (T10)		31	26 - 33
Fibra de Nopal (FN)	0.5%	32	
	1.5%	31.5	
Almidón o fécula de maíz (MZ) + Fibra de Nopal (FN)	MZ 2% - FN 0.5%	31.5	

De acuerdo a lo resultados obtenidos en todas las mezclas en estudio rebasaron el 30% de consistencia normal, encontrándose en el límite inferior de estos valores comparativos. El almidón y la fibra de nopal como sustitutos del cemento son absorbentes de agua, y los valores de las 3 mezclas con porcentaje de sustitución superaron a la mezcla testigo en su consistencia normal.

4.1.1.3 Fraguado del material cementante

Los resultados de los tiempos de fraguado para cada mezcla del material cementante se muestran a continuación:

Tabla 4.3 Resultados del tiempo de fraguado

Mezcla de material cementante		Tiempos de fraguado		Límite por norma	
		Inicial (min)	Final (min)	Inicial (min)	Final (min)
T10		150	390	90 mín.	1080 máx.
FN	0.5%	120	1260		
FN	1.5%	210	1515		
MZ - FN	2% - 0.5%	135	1174		

La norma NMX-C-177-ONNCCE-1997, especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado y sus límites de acuerdo al tiempo inicial y final de fraguado teniendo así el cumplimiento del fraguado inicial en las 4 mezclas correspondientes en estudio, mientras que para el fraguado final solo la mezcla testigo está dentro del límite permisible. Cabe hacer mención que los materiales orgánicos utilizados para la investigación funcionan como retardantes del fraguado, es por ello que la situación de sobrepasar el límite de fraguado final que la norma específica es un resultado esperado.

4.1.2 Material pétreo: Arena

Los resultados de las pruebas para caracterizar la arena del banco “Joyitas” fueron obtenidas en el laboratorio dentro de los primeros días de la presente investigación y se presentan a continuación.

4.1.2.1 Humedad actual en arenas

De acuerdo a lo establecido en las normas NMX-C-166-ONNCCE-2018; y lo aplicado en esta investigación, se tiene como el porcentaje de humedad actual lo marcado en la tabla siguiente:

Tabla 4.4 Resultados del contenido total de Humedad actual evaporado por secado

Humedad actual (%)				
Muestra de material	Masa Húmeda (g)	Masa seca (g)	Humedad actual (%)	Humedad actual promedio (%)
1	300	296.4	1.21	1.40
2	300	295.8	1.42	
3	300	295.4	1.56	

El porcentaje de humedad actual en la arena en estudio es de 1.4%.

4.1.2.2 Humedad superficial y humedad de absorción en arenas

Se realizaron tres pruebas para obtener un promedio de la humedad de absorción en la arena. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.5 Resultados del por ciento de humedad de absorción en la arena

% de Humedad de Absorción			
Muestra	Mh (g)	Ms (g)	% de Absorción
1	300.0	292.3	2.63
2	300.0	292.2	2.67
3	297.3	290.6	2.31*
		PROMEDIO	2.65

NOTA: *Valor descartado

El resultado de la muestra 3 se consideró inapropiada para la investigación, ya que la cantidad de material no fue la correcta y dicho agregado presentó muchos finos, quedando fuera de lo representativo. Por lo tanto, se consideran las dos primeras muestras y su porcentaje promedio de humedad de absorción resultó de 2.65%.

4.1.2.3 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y suelta se realizó de acuerdo a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 y utilizando 3 muestras representativas de arena, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.6 Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la arena

Determinación de la masa volumétrica seca y suelta					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSS (g/cm ³)
1	1945	6100	4155	2783	1.49
2	1945	5980	4035	2783	1.45
3	1945	5970	4025	2783	1.45
				PROMEDIO	1.46

La masa volumétrica seca y suelta (MVSS) de la arena es de 1.46 g/cm³.

4.1.2.4 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV)

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y varillada se realizó de acuerdo a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.7 Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la arena

Determinación de la masa volumétrica seca y varillada					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSV (g/cm ³)
1	1945	6270	4325	2783	1.55
2	1945	6250	4305	2783	1.55
3	1945	6200	4255	2783	1.53
				PROMEDIO	1.54

La masa volumétrica seca y varillada (MVSV) de la arena es de 1.54 g/cm³.

4.1.2.5 Granulometría en el agregado fino (arena)

Para conocer la distribución granulométrica de la arena, se seleccionaron 3 muestras representativas, para determinar la granulometría y el módulo de finura. Los resultados de la granulometría se presentan a continuación:

Tabla 4.8 Granulometría y módulo de finura de la muestra 1

MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	1	0.25	0.25	99.75
8	20.7	5.175	5.425	94.575
16	88	22	27.425	72.575
30	129.2	32.3	59.725	40.275
50	72.5	18.125	77.85	22.15
100	33.3	8.325	86.175	13.825
200	18.7	4.675	90.85	9.15
CHAROLA	36.6	9.15	100	0
SUMA	400	100	447.7	352.3
Módulo de Finura (MF)	2.57			

Tabla 4.9 Granulometría y módulo de finura de la muestra 2

MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	2	0.5	0.5	99.5
8	22.6	5.65	6.15	93.85
16	73.4	18.35	24.5	75.5
30	124.9	31.225	55.725	44.275
50	76.9	19.225	74.95	25.05

100	37.9	9.475	84.425	15.575
200	20.6	5.15	89.575	10.425
CHAROLA	41.7	10.425	100	0
SUMA	400	100	435.83	364.175
Módulo de Finura (MF)	2.46			

Tabla 4.10 Granulometría y módulo de finura de la muestra 3

MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	0.7	0.175	0.175	99.825
8	30.4	7.6	7.775	92.225
16	84.7	21.175	28.95	71.05
30	123.2	30.8	59.75	40.25
50	69.2	17.3	77.05	22.95
100	35.4	8.85	85.9	14.1
200	19.4	4.85	90.75	9.25
CHAROLA	37	9.25	100	0
SUMA	400	100	450.35	349.65
Módulo de Finura (MF)	2.60			

Del promedio de las tres muestras se obtuvo el módulo de finura igual a 2.54 (Véase Tabla 4.11), el cual, según la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 y de acuerdo a parámetros de calidad, está dentro de los rangos especificados de 2.5 y 3.

Tabla 4.11 Granulometría y módulo de finura promedio

MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	1.23	0.31	0.31	99.69
8	24.57	6.14	6.45	93.55
16	82.03	20.51	26.96	73.04
30	125.77	31.44	58.40	41.60
50	72.87	18.22	76.62	23.38
100	35.53	8.88	85.50	14.50
200	19.57	4.89	90.39	9.61
CHAROLA	38.43	9.61	100.00	0.00
SUMA	400.00	100.00	444.63	355.38
Módulo de Finura (MF)	2.54			

La distribución granulométrica de la muestra se presenta en la Figura 4.1 junto con los límites superior e inferior establecidos por la norma mexicana, en la cual se observa que la arena de banco utilizado en la investigación se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 para la elaboración de los morteros, ya que el comportamiento de la línea granulométrica se encuentra a 2/3 por dentro y similar al de los límites para morteros.

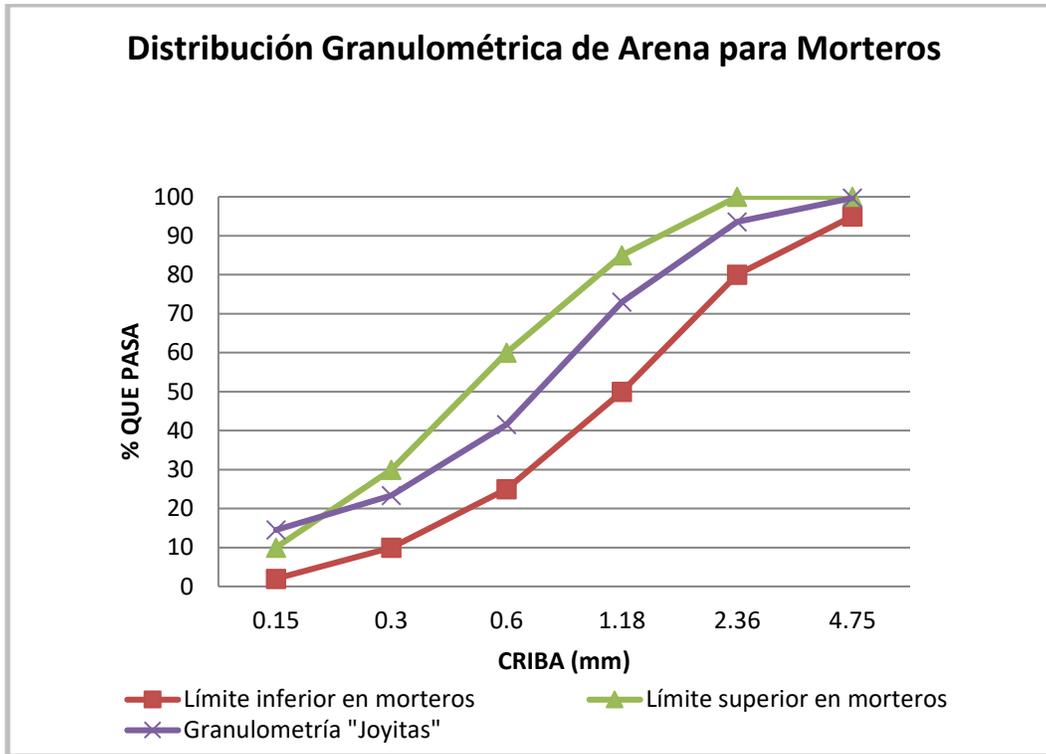


Figura 4.1 Gráfica de composición granulométrica de la arena del banco "Joyitas".

4.1.2.6 Colorimetría en arenas

Se tomaron 3 muestras de arena a las cuales se les efectuó la prueba de colorimetría y los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.12 Resultados de la prueba de colorimetría

Prueba de Colorimetría	
No. Muestra	No. de Tabla Colorimétrica
1	2
2	2
3	2

El color observado en las 3 muestras es similar al color número 2 de la tabla colorimétrica, por lo que podemos decir que el material cumple con las especificaciones de la prueba y por lo tanto es aceptable, debido a que no contiene exceso de materia orgánica. El contenido de impurezas orgánicas se expresa en función de la coloración que éstas produzcan respecto de un color de referencia.

En la Figura 4.2 se muestra una fotografía de la comparativa de la tabla colorimétrica y las muestras de material.



Figura 4.2 Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica

4.1.2.7 Sedimentación en arenas

Se realizó la prueba a tres muestras representativas de arena, cumpliendo dos de ellas (muestra 2 y 3) con lo establecido en las especificaciones marcadas por el Manual Laboratorio de Análisis de Materiales (Navarro *et al*, 2011), en donde el material fino no rebasa la marca de 444 ml por lo cual podemos concluir que el contenido de material fino es aceptable.

La Figura 4.3 muestra una fotografía de los resultados.



Figura 4.3 Resultados de la prueba de sedimentación

4.1.2.8 Material que pasa por la malla No. 200

Una vez realizada la prueba para conocer el material que pasa por la malla No. 200 se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Porcentaje de material fino que contiene la arena

Material que pasa por la malla No. 200			
Muestra	Masa inicial (Mi, g)	Masa final (Mf, g)	A (%)
1	597.7	553.8	7.34
2	597.7	552.5	7.56
3	598.45	561.6	6.16

De acuerdo a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, los valores están dentro de límite permisible para elaborar concretos presforzados, en nuestro caso, para un mortero sometido a compresión, el valor límite es de un 8%. Por lo tanto, el contenido de material fino es aceptable.

4.1.2.9 Terrones de arcilla

Es de suma importancia conocer el contenido de terrones de arcilla que contiene una arena, debido a que son partículas de baja resistencia estructural que en contacto con agua se convierten en lodos que son perjudiciales para el concreto y mortero.

La Tabla 4.14 muestra el cálculo y el promedio de las muestras 1 y 2, dado que la muestra 3 no cumplía con lo establecido por el procedimiento de prueba, es decir contenía un exceso de terrones de arcilla.

Tabla 4.14 Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena

% de Terrones de arcilla en la arena			
Muestra	Mi (g)	Mf (g)	% Terrones de arcilla
1	100	99.4	0.6
2	100	99.3	0.7
3	100	98.8	1.2*
		PROMEDIO	0.65

NOTA: *Valor descartado

Por lo tanto, se obtuvo al final un resultado de porcentaje de terrones de arcilla de 0.65%. Lo que indica un bajo y aceptable contenido de terrones de arcilla en la arena. Este valor está dentro de los rangos que indica la norma ASTM-C142/C142M-17, los cuales se encuentran entre 0.6 y 1.2 % y la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2018, la cual especifica un valor máximo permisible de 3% en la masa total de la muestra que de igual manera cumple con el resultado de la prueba.

4.1.2.10 Densidad de la arena

Los resultados de la prueba de densidad se muestran en la Tabla 4.15. El promedio indica que la densidad del material es alta, es decir, es de buena calidad.

Tabla 4.15 Resultados de la densidad de la arena

Densidad de la arena				
Muestra	Ma (g)	Vf (cm ³)	Vi (cm ³)	Densidad (DA) g/cm ³
1	300	450	328.3	2.47
2	300	450	329.1	2.48
3	300	450	328.6	2.47
			PROMEDIO	2.47

4.1.2.11 Equivalente de arena

En esta prueba se determinaron las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene la arena, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de dichos materiales finos establecidos en la norma NMX-C-480-ONNCCE-2014.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.16 Resultados de equivalente de arena

% Equivalente de arena			
Muestra	Lectura de Finos	Lectura de Arena	% Equivalente de arena
1	10.9	10.1	92.66
2	10.5	9.7	92.38
3	11.4	10.4	91.23
		PROMEDIO	92.09

La desviación estándar para un solo operador, es de 1.5 para equivalentes de arena mayores a 80%, y 2.9 para valores menores que 80%.

Los reglamentos de construcción para cada entidad establecen los valores permisibles, para este estudio se comparó con el Reglamento de construcción del Estado de Michoacán, el cual menciona que es aceptable un equivalente de arena con un valor mayor a 85%, por lo que el valor obtenido de las 3 muestras, referidos en la tabla 4.16 anterior, cumple con lo establecido con la especificación del reglamento.

4.2 Ensayos realizados al mortero fresco

Conforme a lo establecido en el capítulo 3, se realizaron los siguientes ensayos al mortero fresco.

4.2.1 Fluides

Los resultados obtenidos de fluides se describen a continuación en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Resultados de la prueba de fluidez para las distintas mezclas en estudio

% Fluidez en las distintas mezclas								
Mezcla	Cantidades de material para la mezcla					Relación a/c	Aditivo (%)	Fluidez (%)
	Cemento (g)	FN (g)	MZ (g)	Arena (g)	Agua (ml)			
Testigo (T10)	163.64	-	-	450	111.27	0.68	-	99
FN 0.5%	162.82	0.82	-	450	111.27	0.68	0.3	115
FN 1.5%	161.18	2.45	-	450	111.27	0.68	0.55	104
MZ 2% FN 0.5%	159.55	0.82	3.27	450	111.27	0.68	0.56	112

Se tomó un rango del 90% al 115 %, debido a que la arena se utilizó con todos los tamaños para elaborar el concreto, y la absorción de dicha arena es de 2.54 %, la cual no se corrigió. Es importante tomar la muestra de manera que sea homogénea para obtener la misma trabajabilidad.

4.2.2 Potencial de hidrogeno (pH)

De acuerdo al método que se utilizó para esta medición, el resultado del pH se mantuvo entre 12 y 14, lo cual indica que las mezclas tienen carácter alcalino, tal y como se ilustra en la Figura 4.4.



Figura 4.4 Resultados del pH en el mortero fresco

4.3 Ensayos realizados al mortero endurecido

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos en pruebas destructivas, no destructivas y de durabilidad.

4.3.1 Pruebas no destructivas

De acuerdo a las pruebas no destructivas indicadas en la metodología, se presentan a continuación los resultados alcanzados.

4.3.1.1 Densidad

El peso específico o densidad de un mortero de cemento convencional de buena calidad es de 2.1 g/cm^3 aproximadamente. En las Figuras 4.5 y 4.6, se presentan los resultados de la densidad para cada mezcla en las distintas edades de prueba, considerando que estas son edades tardías.

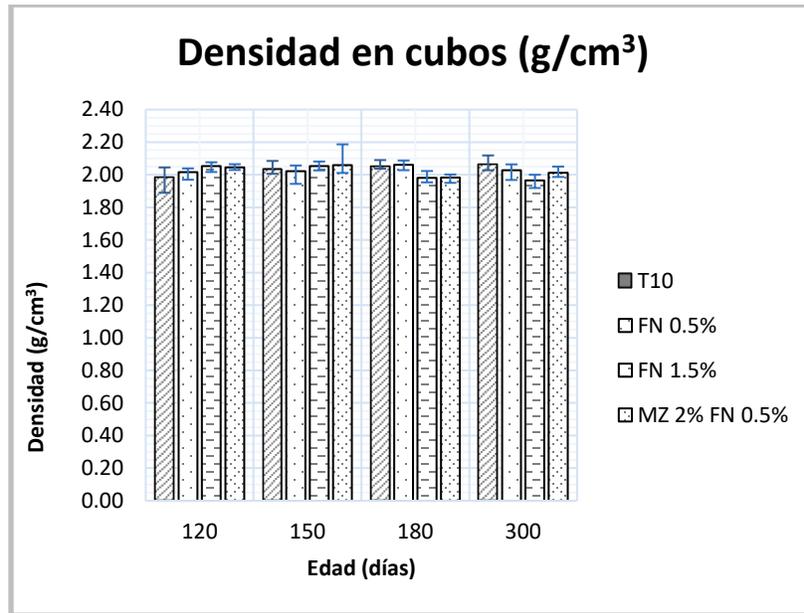


Figura 4.5 Resultados de densidad a edades tardías

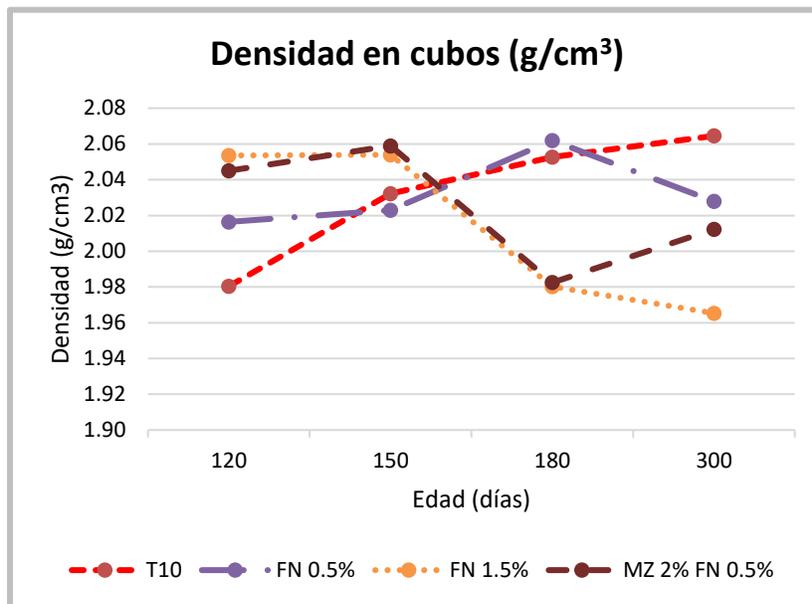


Figura 4.6 Tendencia de resultados de densidad, por su edad de prueba

En las Figuras 4.5 y 4.6, se observa que las mezclas en estudio logran una densidad a los 300 días menor a la mezcla control o testigo, siendo este un valor aproximado a los 2000 kg/m³.

Considerando que los morteros tradicionales alcanzan una densidad de hasta 2100 kg/m³, se puede concluir que la matriz de los morteros con sustituciones orgánicas se encuentra en buenas condiciones y son considerados de una calidad aceptable.

De manera particular en la Figura 4.5 se observa que la densidad de los cubos a edades tardías en las tres diferentes mezclas con sustituciones, están por debajo de la densidad que presenta la mezcla testigo a los 300 días, ya que al estar totalmente saturado cada espécimen considerado como masa constante, su volumen va incrementándose gradualmente.

4.3.1.2 Gravedad específica (densidad relativa)

Sobre la gravedad específica, las Figura 4.7 y 4.8 permitieron identificar que las tres mezclas con sustituciones orgánicas en comparación con la mezcla testigo, tienen valores promedio más altos a lo largo de todas las edades en estudio. Tomando en consideración que tanto para edades tempranas (López, 2016) como para edades tardías, la mezcla con sustitución del 1.5% de fibra de nopal (FN) presentó mejores resultados en la prueba. Esto indica que las sustituciones densifican la matriz cementicia del mortero.

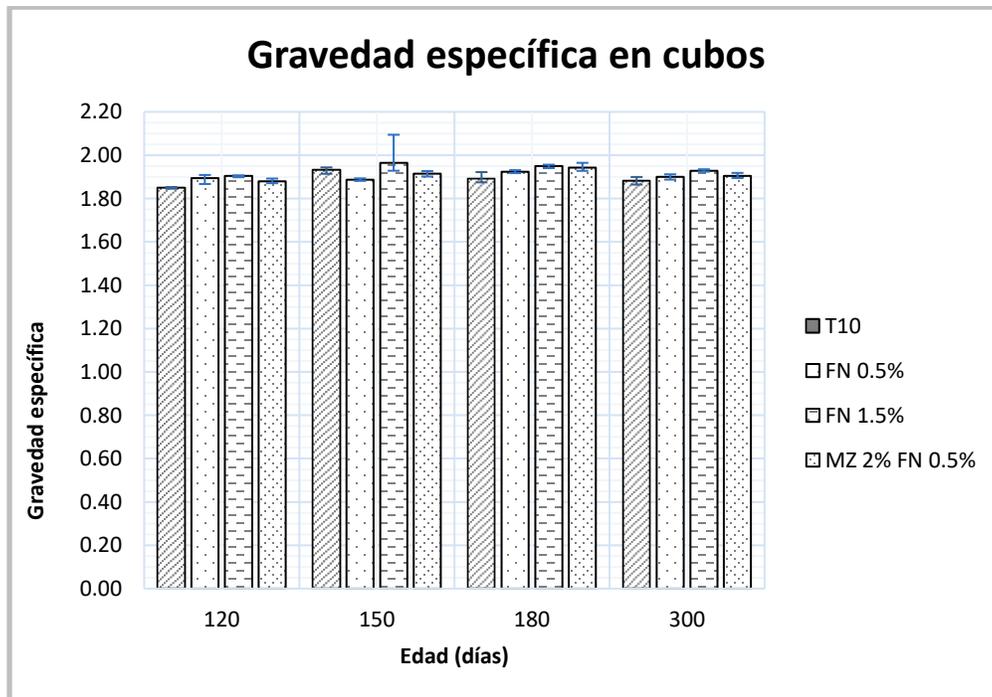


Figura 4.7 Resultados de gravedad específica a edades tardías

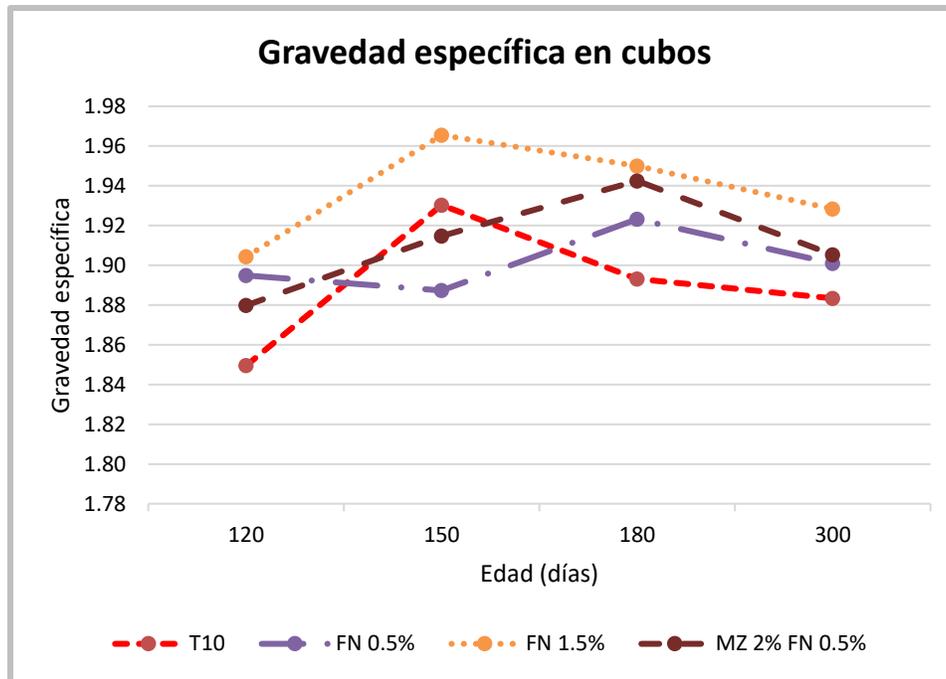


Figura 4.8 Tendencia de la gravedad específica, por su edad de prueba

4.3.1.3 Resistividad eléctrica

En cuanto a resistividad eléctrica, se realizó la prueba a especímenes cúbicos, prismáticos y cilíndricos, los resultados fueron muy peculiares respecto al comportamiento de las mezclas con sustituciones en estudio conforme transcurrió el tiempo, por ejemplo, a la edad de 300 días, la resistividad estuvo muy por encima de los valores de la muestra testigo.

La práctica ha demostrado que los valores de resistividad eléctrica (ρ) en los especímenes ensayados se pueden emplear como parámetros de durabilidad, así teniendo en cuenta un criterio general, según la normativa NMX-C-514-ONNCCE-2016 para la evaluación del mortero, este puede ser con muy bajas o muy altas velocidades de corrosión según sea el caso. Los valores de resistividad se presentan en las Figuras 4.9-4.14, cuyos principales resultados fueron morteros con velocidades de corrosión moderada o alta.

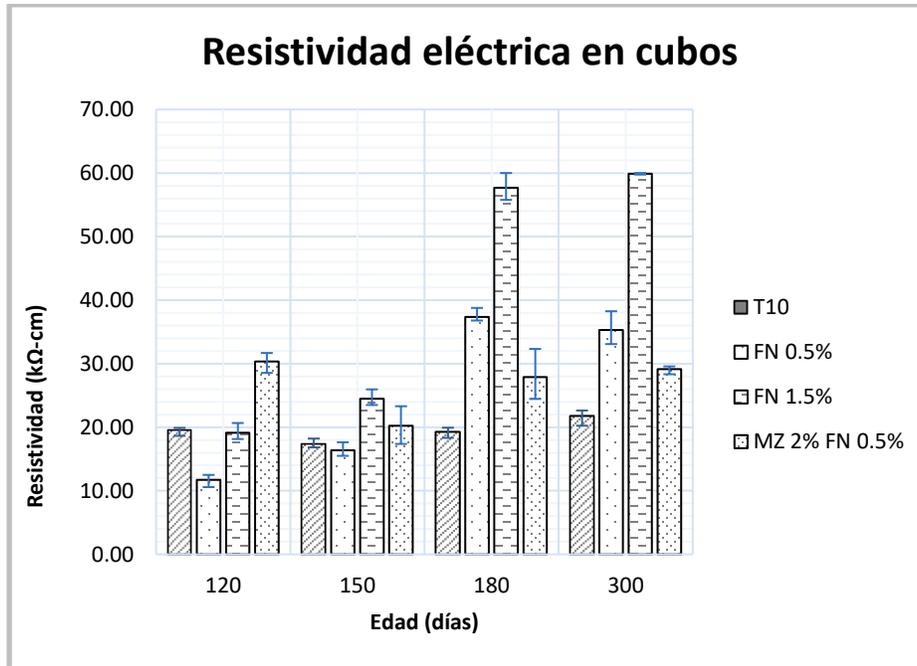


Figura 4.9 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cubos, a edades tardías

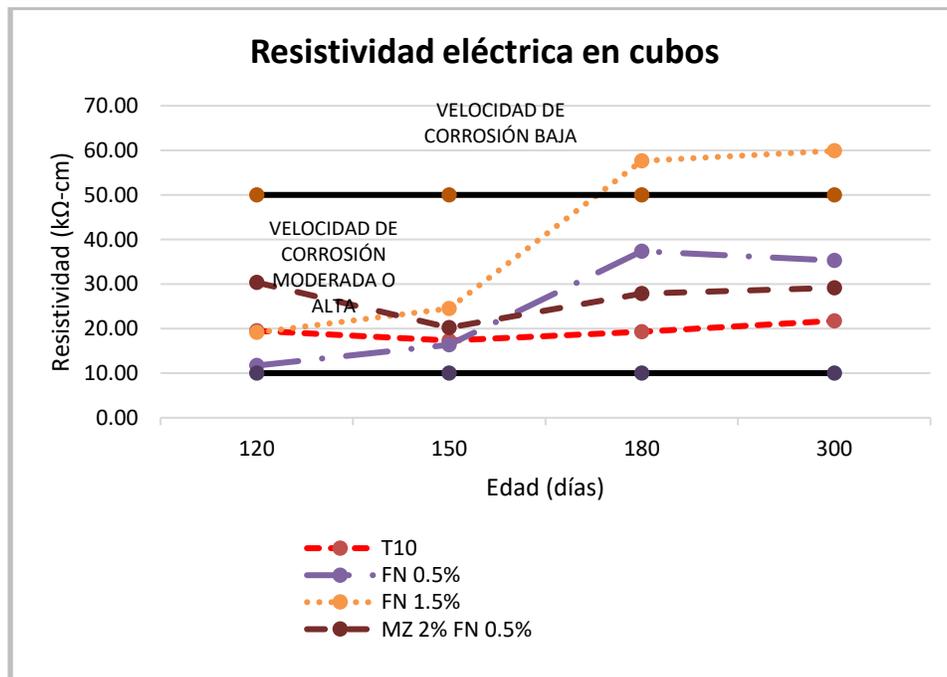


Figura 4.10 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos, por su edad de prueba

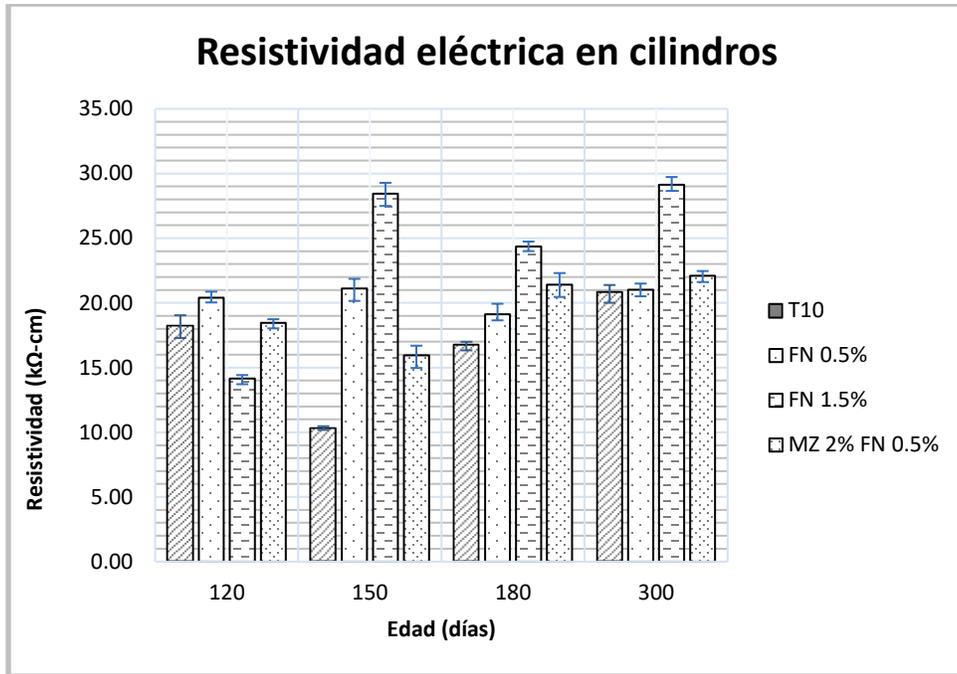


Figura 4.11 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cilindros, a edades tardías

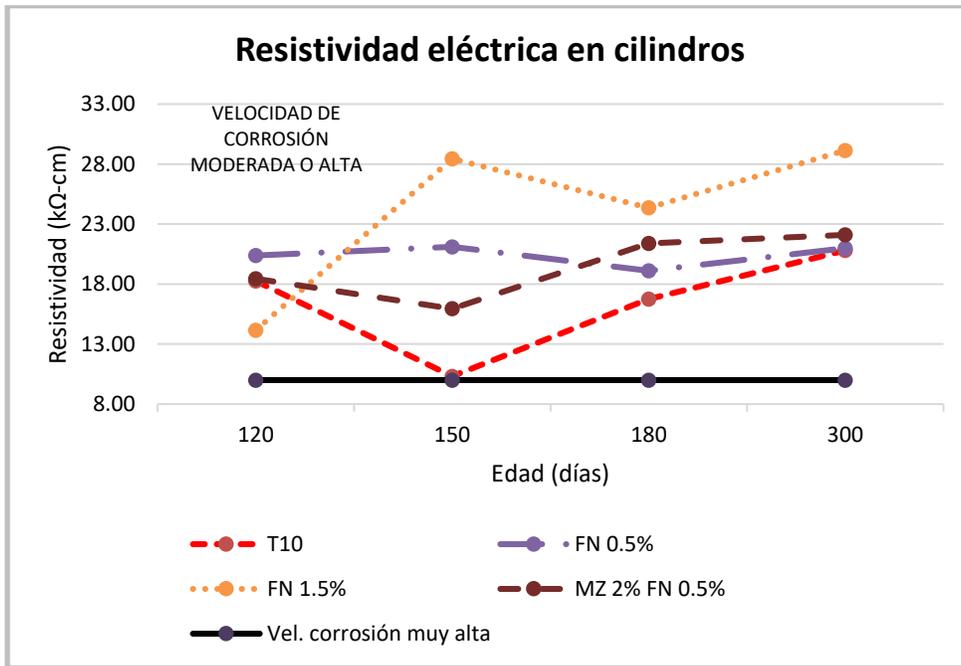


Figura 4.12 Tendencia de resistividad eléctrica en cilindros, por su edad de prueba

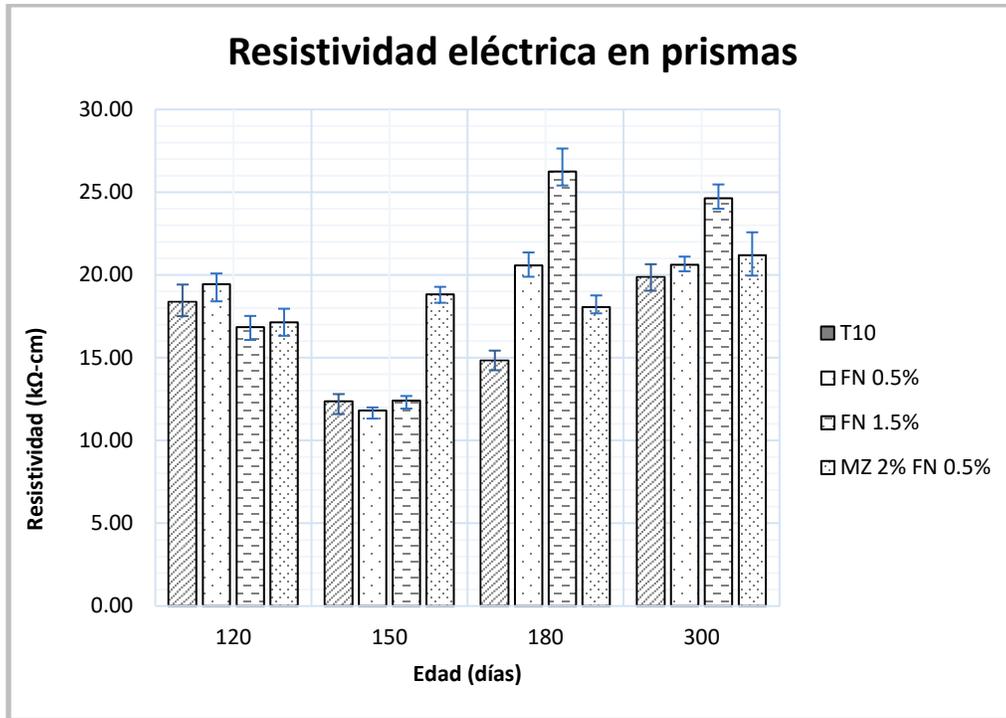


Figura 4.13 Resultados de resistividad eléctrica (RE) en prismas, a edades tardías

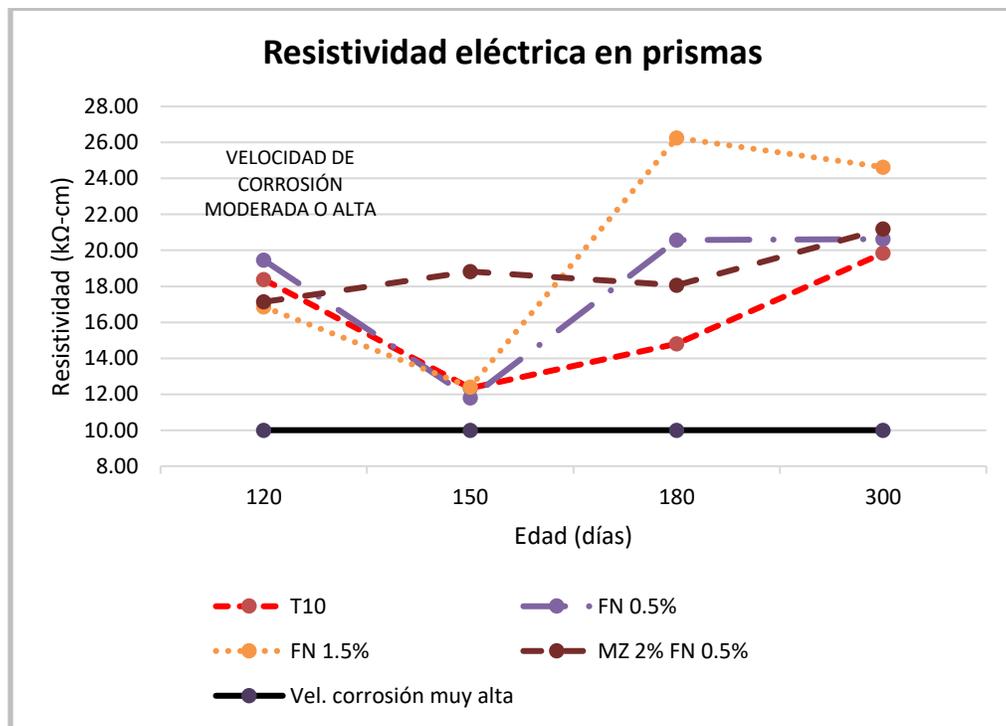


Figura 4.14 Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba

En este ensayo de resistividad eléctrica, el T10 presenta valores por debajo de las distintas mezclas con sustituciones, permaneciendo este comportamiento durante las diferentes edades de prueba hasta llegar a la edad final de 300 días.

En las Figuras 4.10, 4.12 y 4.14, se observa que la fibra de nopal como sustitución en 1.5% (FN 1.5%) de la masa del cemento presenta un aumento de su resistividad a partir de 150 días en adelante, sobresaliendo de las demás mezclas y obteniendo valores de hasta 59.9 k Ω -cm en especímenes cúbicos. El comportamiento de las otras dos mezclas restantes (FN 0.5% y MZ 2% FN 0.5%) es muy similar a la de la muestra testigo.

4.3.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En las Figuras 4.15 a 4.20 se graficaron los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico para especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos a cuatro edades tardías de prueba (120, 150, 180 y 300 días).

Los resultados de las 3 distintas mezclas con sustituciones en estudio muestran una tendencia similar al de la muestra testigo (T10) pero con valores ligeramente menores a este, alcanzando valores a la edad de 300 días de hasta 4172.25 m/s en prismas con sustitución parcial de 0.5% de fibra de nopal, los cuales se clasifican por la RED DURAR (2000), como morteros de calidad durable.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en los distintos especímenes de prueba, como se observa en las Figuras 4.16, 4.18 y 4.20, presentó resultados con una calidad del mortero alta y durable a los 300 días de prueba, siendo la mezcla de 0.5% en sustitución con fibra de nopal (FN 0.5%) la de mejor comportamiento en los tres diferentes especímenes, específicamente en prismas.

Los valores de los resultados de las mezclas MZ 2% FN 0.5% y FN 1.5% están por debajo de la mezcla testigo, mientras que la muestra FN 0.5% registró parámetros de alta calidad y durabilidad en los diferentes especímenes ensayados.

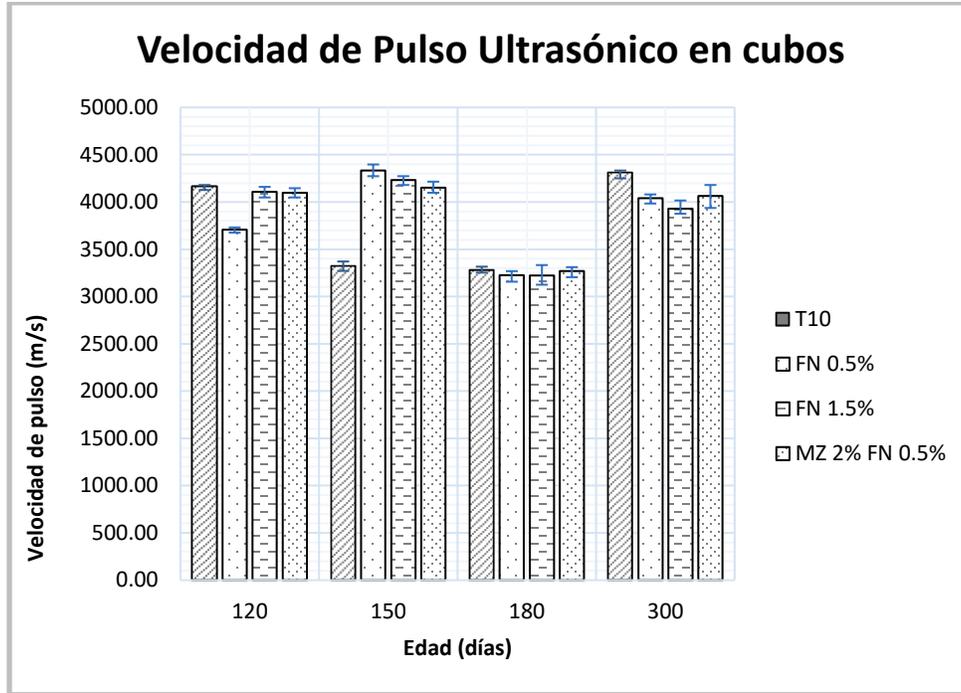


Figura 4.15 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cubos, a edades tardías

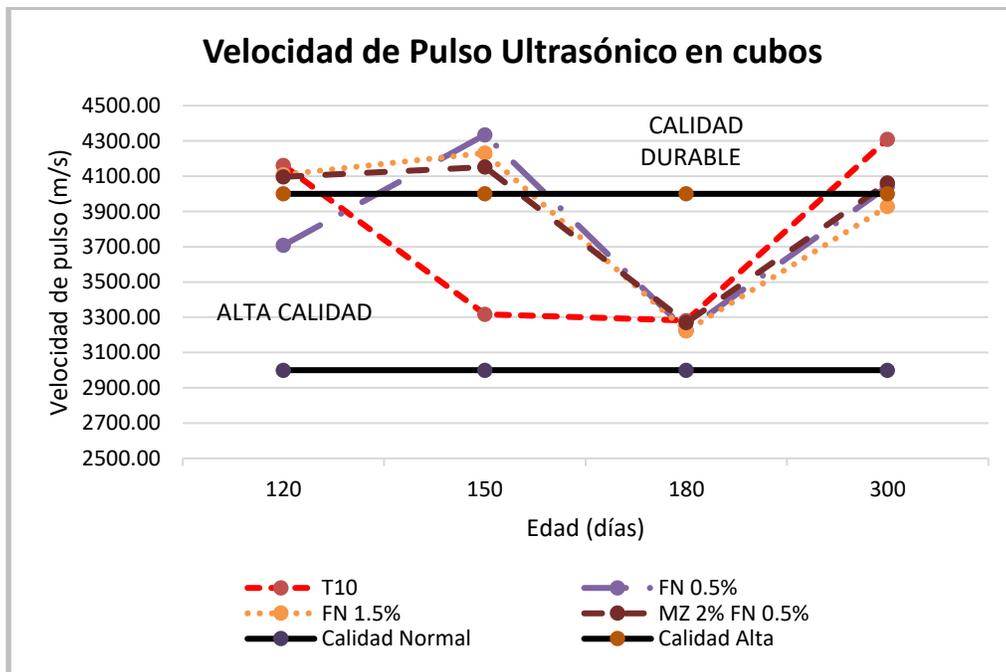


Figura 4.16 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos, por su edad de prueba

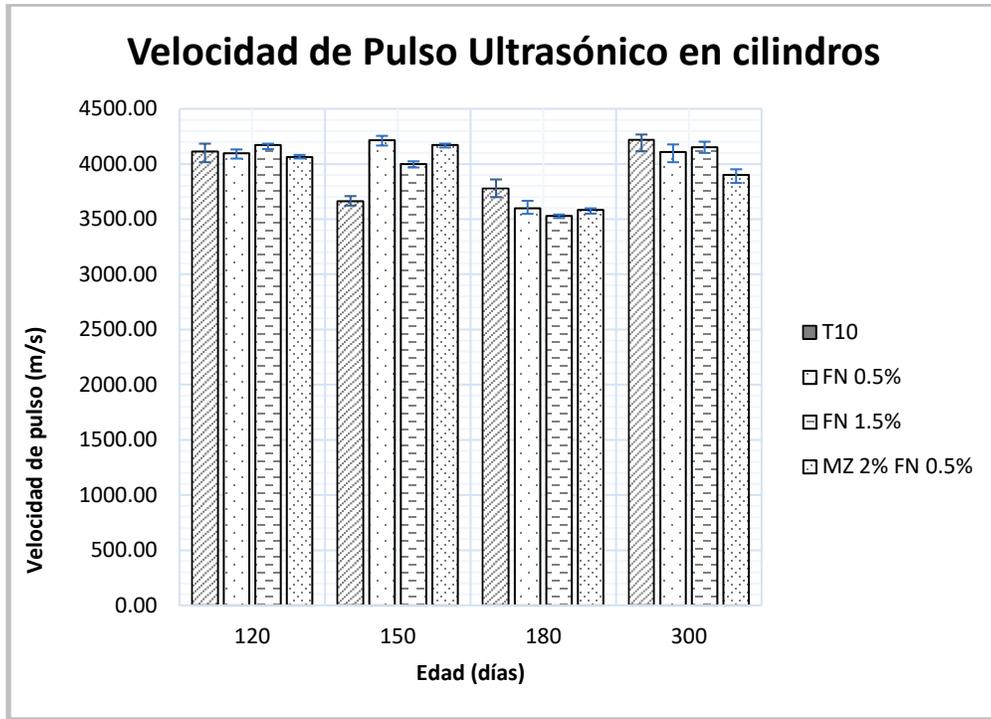


Figura 4.17 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cilindros, a edades tardías

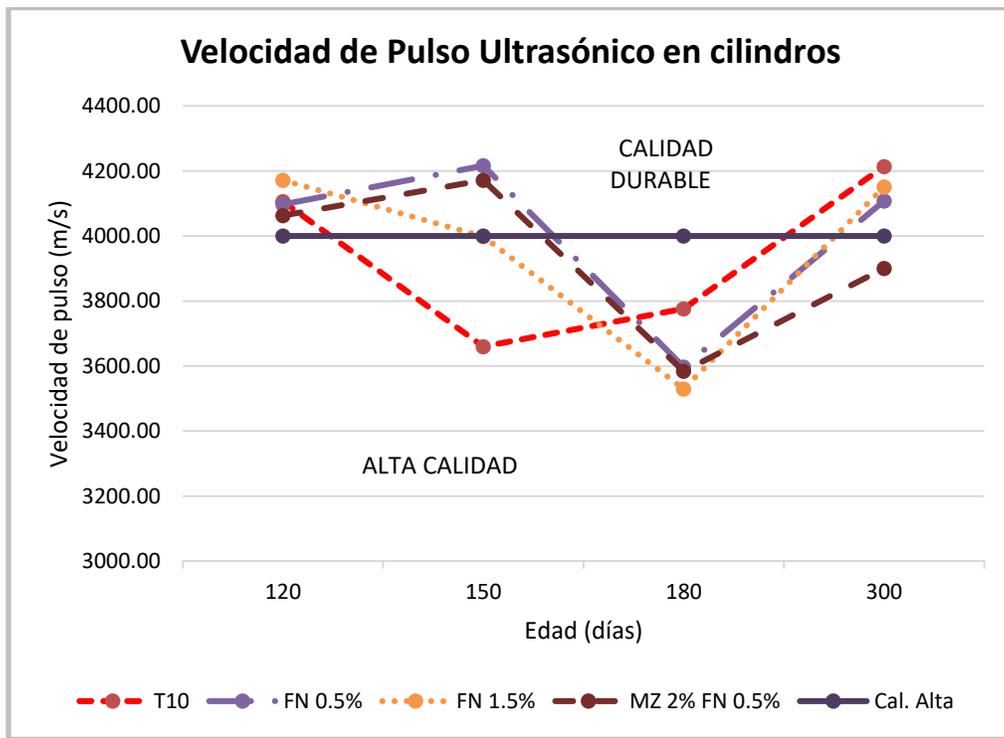


Figura 4.18 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros, por su edad de prueba

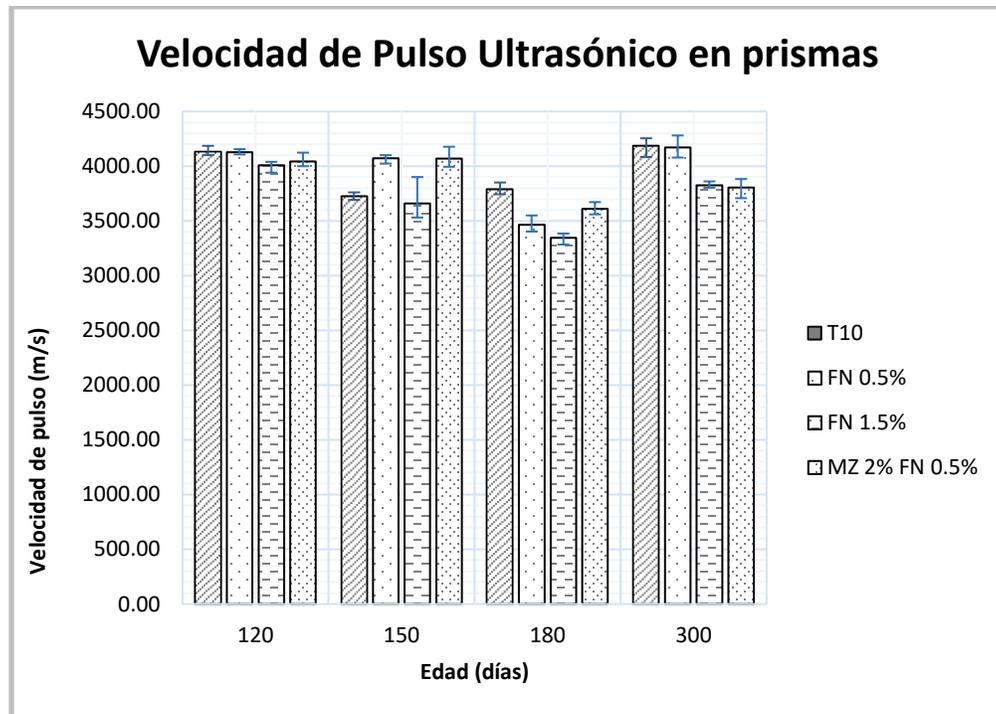


Figura 4.19 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en prismas, a edades tardías

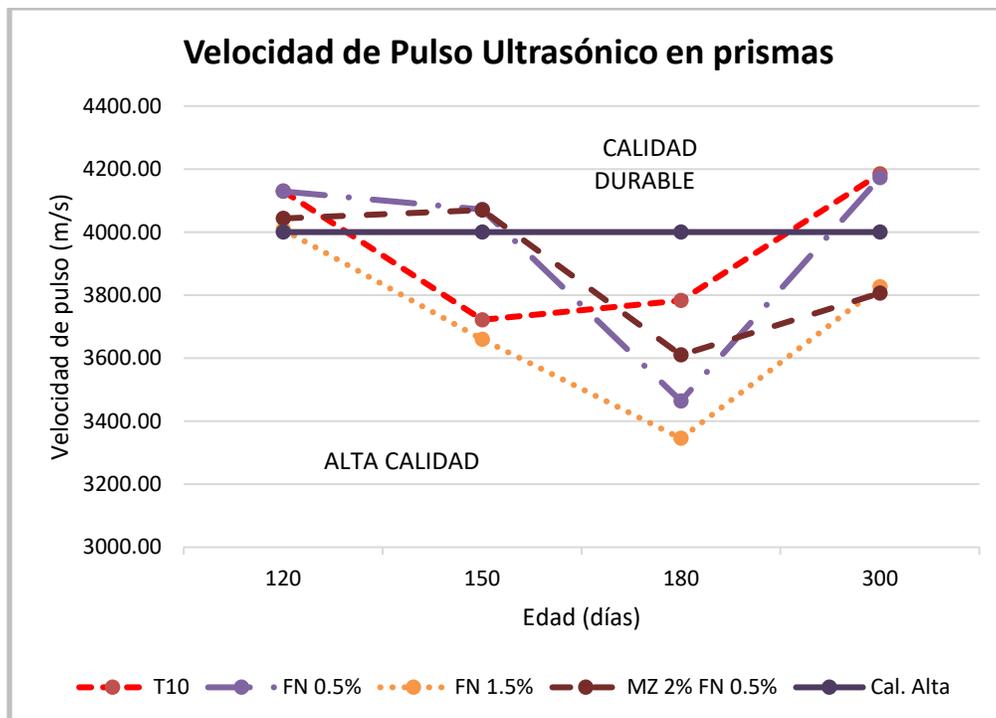


Figura 4.20 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en prismas, por su edad de prueba

4.3.2 Pruebas destructivas

En este apartado se presentan los resultados realizados a través de pruebas destructivas.

4.3.2.1 Resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple es una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de las distintas muestras de la presente investigación respecto a su capacidad de resistencia mecánica; además de que, para morteros es la única prueba que se encuentra normada respecto a cubos de 5 cm de lado.

Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión simple de las diferentes mezclas de mortero respecto al mortero testigo, alcanzando valores de hasta 32.30 MPa (mezcla de MZ 2% FN 0.5%) a los 300 días de edad, quedando por debajo de la mezcla testigo (T10).

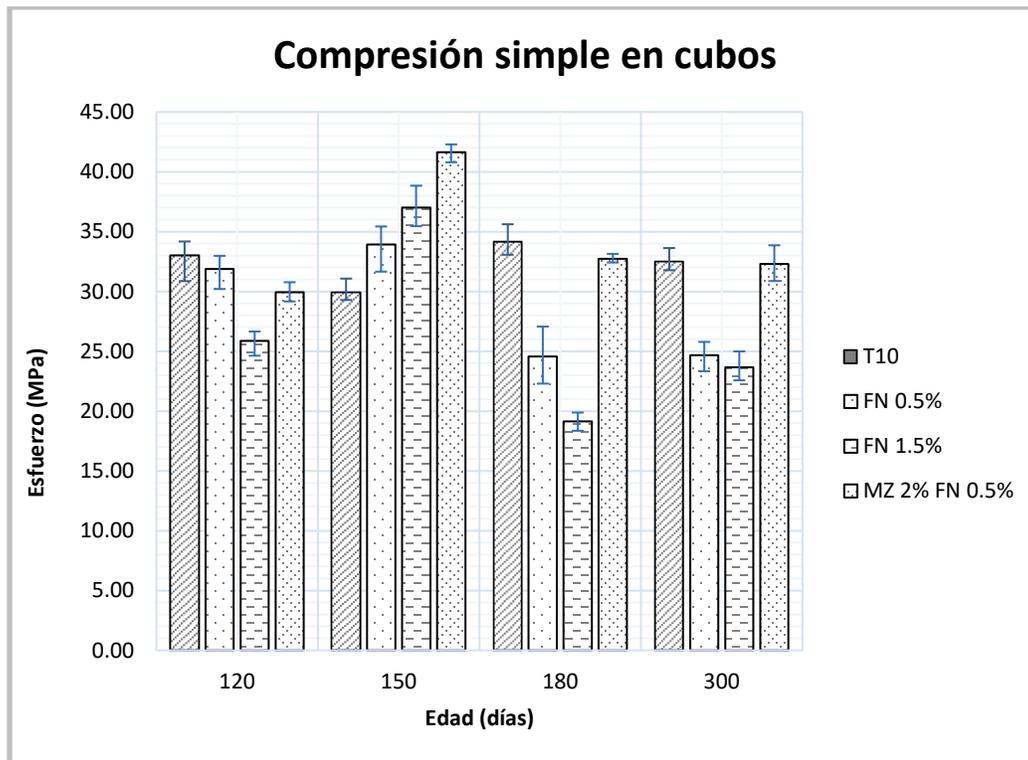


Figura 4.21 Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba

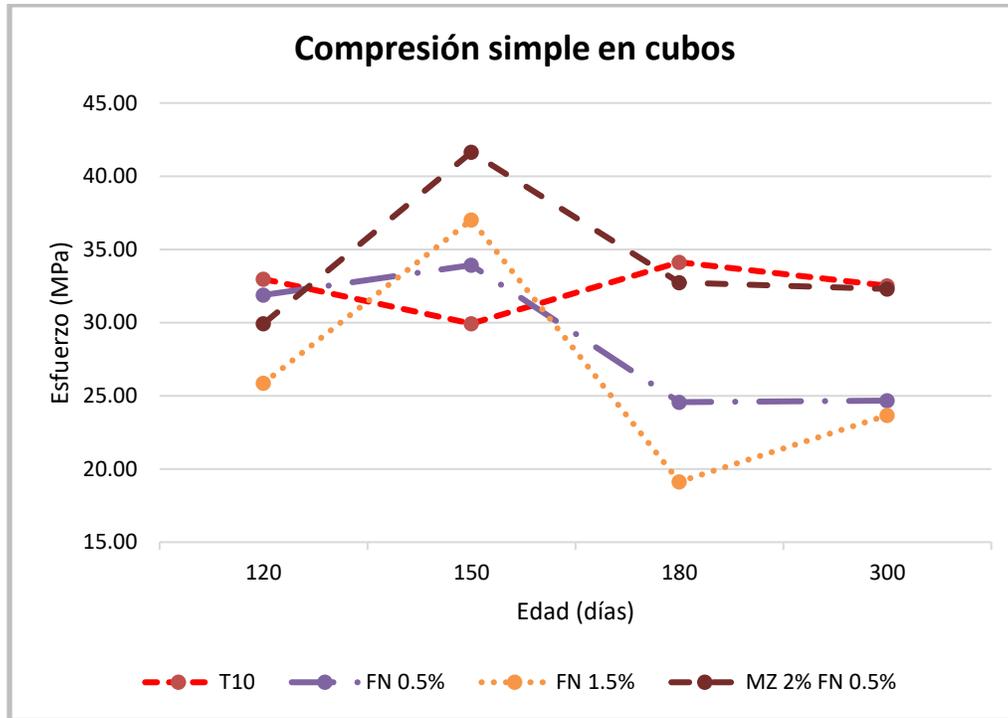


Figura 4.22 Tendencia de compresión simple en cubos, por su edad de prueba

La combinación de la fibra de nopal con fécula de maíz (MZ 2% FN 0.5%) en sustitución de la masa del cemento en la mezcla de mortero arrojó resultados satisfactorios, teniendo un comportamiento similar al mortero testigo (T10), y como se observa en la Figura 4.22 a la edad de 150 días el valor incrementó considerablemente hasta 41.63 MPa, superando al T10 y a las demás mezclas con sustitución de fibra de nopal, sin embargo, su comportamiento se mantuvo en las siguientes edades de prueba por debajo del testigo pero muy similar a este; teniendo como significado usual que la matriz cementicia de los morteros ha logrado su densificación manteniendo su resistencia conforme transcurre el tiempo.

El mejor resultado de la compresión simple en los cubos de mortero con fibra de nopal se presentó a la edad de 150 días con un valor de 37.02 MPa para la mezcla de FN 1.5%, presentando a lo largo de las demás edades esfuerzos a compresión simple por debajo de la FN 0.5%.

Las especificaciones de la normativa mexicana NMX-C-021-ONNCCE-2015, para morteros de albañilería sin adiciones establece que la resistencia a compresión de los morteros a 7 días debe ser de 4.4 MPa, y de 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos. Ahora bien, si la comparación la realizamos con los morteros de la investigación teniendo en cuenta que las edades de prueba son tardías, las cuatro mezclas en estudio incluyendo el mortero testigo, se encuentran muy por encima de las especificaciones que establece la normativa (Véase la Figura 4.21).

El valor de la resistencia mecánica no es el único indicativo de la durabilidad del concreto, pero en general se acepta que concretos de elevada resistencia (>45

MPa) son durables y que concretos por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad (Torres *et al*, 2010). Comparando lo anterior con los resultados de la Figura 4.21 se determina que los morteros en estudio se encuentran con una durabilidad y resistencia moderada y por encima de los 20 MPa.

4.3.2.2 Resistencia a la tensión por flexión en prismas de 4 x 4 x 16 cm.

En investigaciones previas, se ha identificado que el valor del esfuerzo a la flexión del concreto o valor del módulo de ruptura en especímenes de forma prismática es de 0.7 a 0.8 por la raíz del esfuerzo a compresión (Kosmatka *et al*, 2004). En el caso del ensayo que se realizó para esta investigación de acuerdo a lo observado en la Figura 4.23, todas las mezclas de morteros con y sin sustitución de material orgánico trabajan a flexión ya que ninguna está por debajo de los límites que indica la referencia indicada, e incluso lo superan en todos los casos siendo la de menor resistencia a la flexión la mezcla FN 1.5%.

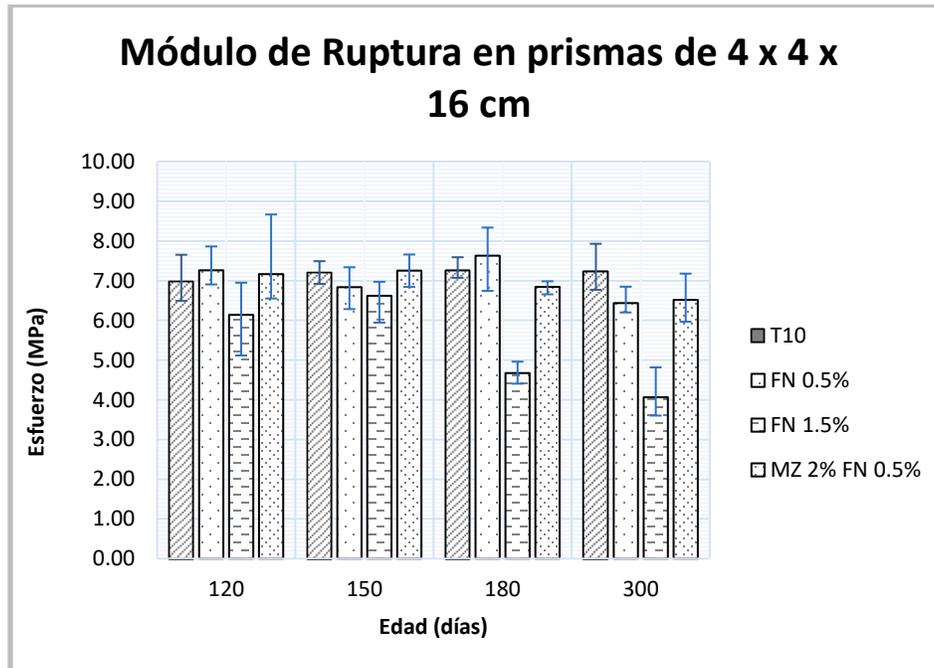


Figura 4.23 Resultados de resistencia a la flexión en prismas, a edades tardías

En la Figura 4.24 se puede observar que el mortero testigo (T10) tiene un comportamiento estable en las cuatro edades de prueba logrando una resistencia a flexión mayor que los morteros con porcentaje de sustitución de fibra de nopal y almidón. Comparando los datos de las tres mezclas con sustituciones analizadas en esta investigación se observa que la fibra de nopal con 0.5% de sustitución logra superar a la edad de 120 y 180 días el valor de la flexión del T10, y a lo largo de las edades de prueba su comportamiento es mejor que las otras dos mezclas (FN 1.5% y MZ 2% FN 0.5%). Se destaca que el mortero de FN 1.5% presenta los resultados de flexión más desfavorable.

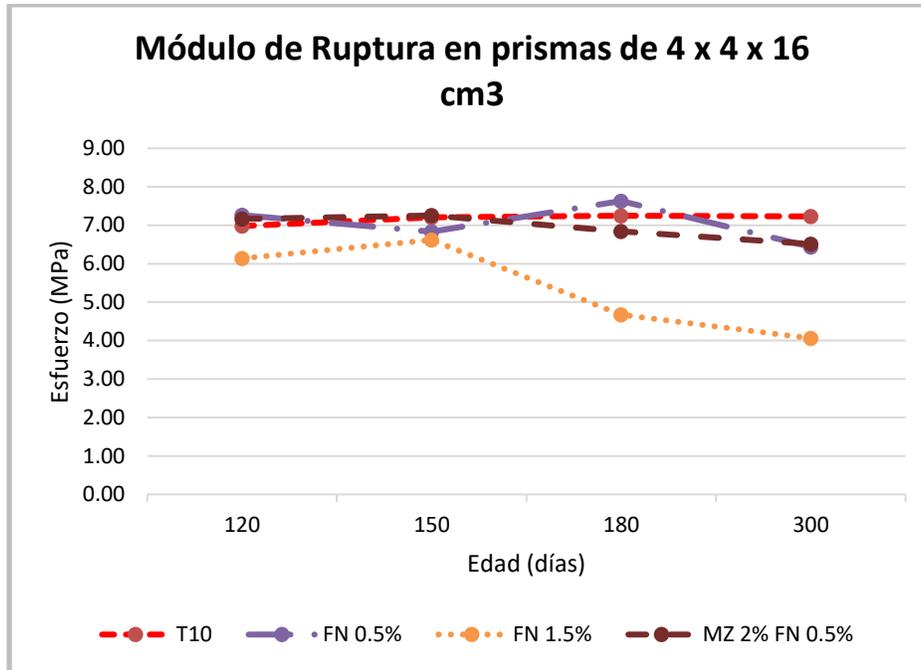


Figura 4.24 Tendencia de resistencia a la flexión en prismas, por su edad de prueba

4.3.2.3 Resistencia a la tensión directa en briquetas

El mortero resiste bajas cargas a tensión, por lo cual los valores obtenidos a través de este ensayo no tienen mayor trascendencia, ya que, en los diseños estructurales, siempre se asume que el concreto o mortero estará trabajando a compresión o incluso flexión si fuera el caso. El principal interés del resultado es que ayuda a identificar el agrietamiento de las mezclas luego del proceso de secado.

En la presente investigación se realizaron pruebas de este tipo teniendo valores de tensión directa de hasta 3.63 MPa en la mezcla testigo (T10) y de hasta 3.33 MPa para la mezcla de almidón con fibra de nopal (MZ 2% FN 0.5%), siendo esta última la más favorable de las tres mezclas con sustitución

De acuerdo a lo observado en las Figuras 4.25 y 4.26, las mezclas con sustitución de MZ 2%-FN 0.5% tiene un comportamiento similar al mortero T10, alcanzando valores mayores a los 180 días de hasta 3.33 MPa debajo del valor alcanzado por el T10. Ahora bien, comparando resultados a la edad de 300 días en las distintas mezclas se observa que la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% se encuentra por encima de la mezcla testigo, seguido de la mezcla FN 1.5% y FN 0.5% con valores de 2.43 y 2.24 MPa respectivamente.

Una de las referencias para concreto, especifica que el esfuerzo a tensión se encuentra entre 0.4 a 0.7 por la raíz del esfuerzo a compresión (Neville & Brooks, 1999). Los resultados obtenidos en las cuatro edades de prueba y para las cuatro

diferentes mezclas son favorables, ya que se encuentran dentro de estos rangos y en muchos casos con resistencias superiores.

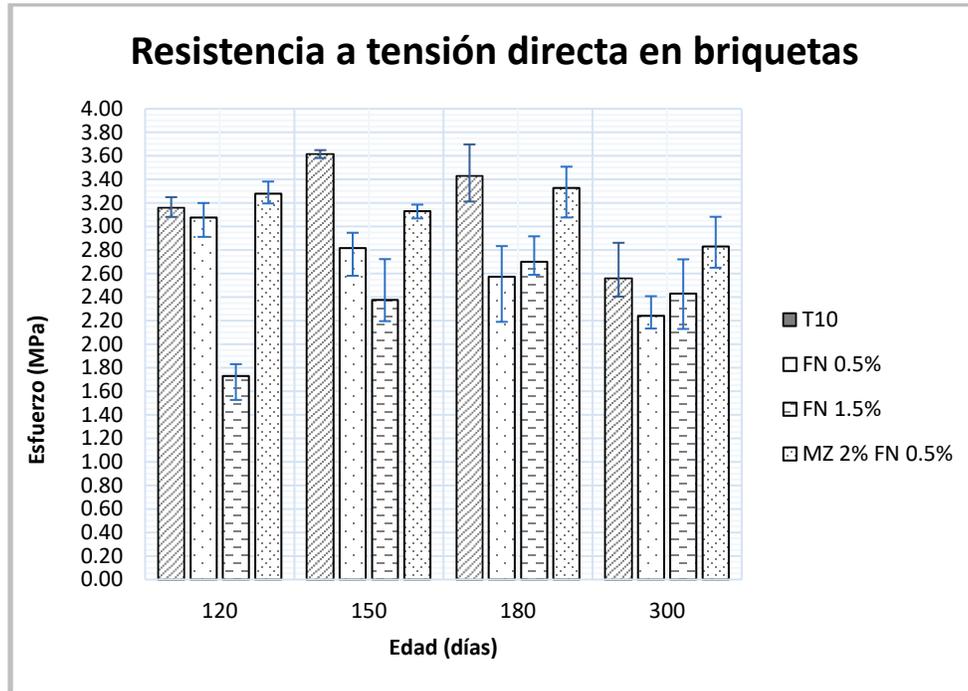


Figura 4.25 Resultados de resistencia a tensión directa en briquetas, a edades tardías

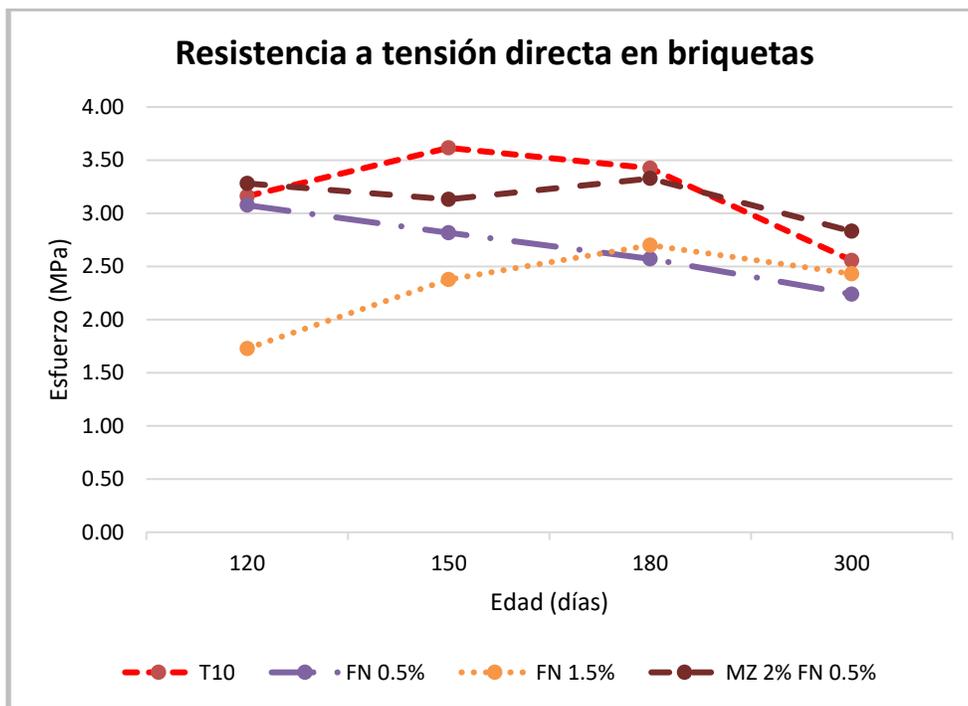


Figura 4.26 Tendencia de resistencia a tensión directa en briquetas, por su edad de prueba

4.3.2.4 Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de mortero (tensión indirecta en cilindros de 5 x 10 cm).

La tensión indirecta un parámetro que es de utilidad cuando no se tienen los elementos necesarios para calcular una tensión directa.

Como resultado de las pruebas realizadas, las Figuras 4.27 y 4.28 muestran que la mezcla MZ 2%-FN 0.5% incrementa su resistencia a tensión indirecta hasta un valor de 4 MPa, quedando este por debajo de la mezcla testigo. La mezcla con 0.5% de sustitución se comportó de distinta manera que en la prueba de tensión directa sobrepasando a todas las mezclas a la edad de 300 días teniendo un resultado de 4.85 MPa e igualando al T10.

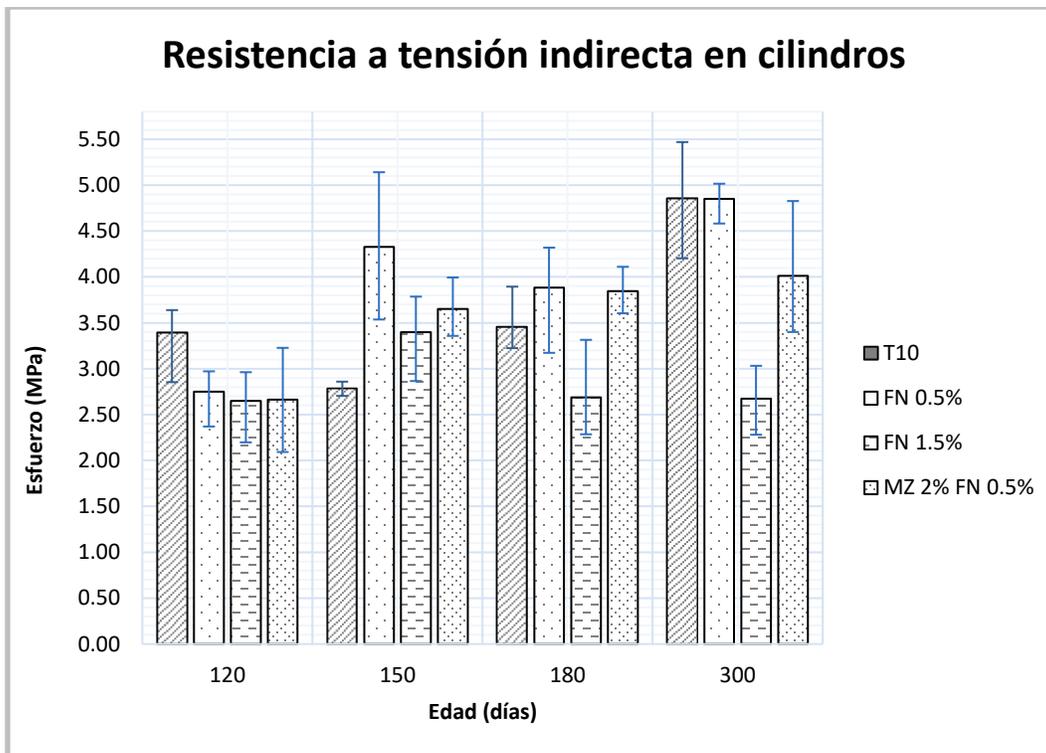


Figura 4.27 Resultados de resistencia a tensión indirecta en cilindros, a edades tardías

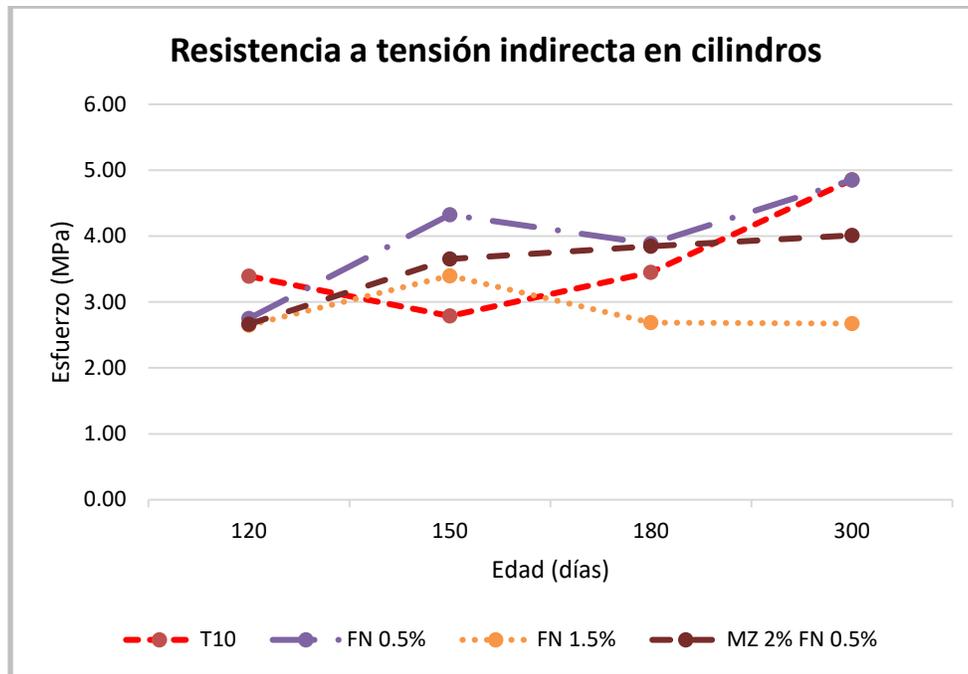


Figura 4.28 Tendencia de resistencia a tensión indirecta en cilindros, por su edad de prueba

4.3.2.5 Comparación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados

A continuación, se presenta un resumen con los resultados obtenidos de las resistencias mecánicas de las diferentes pruebas ya mencionadas. La Tabla 4.18 se elaboró para establecer correlaciones que permitan determinar porcentajes óptimos de sustitución para lograr una resistencia específica.

Tabla 4.18 Comparación de resultados de resistencias mecánicas

Mezcla	Edad (días)	Compresión (Mpa)	0.7 \sqrt Compresión (Mpa)	Flexión (Mpa)	0.8 \sqrt Compresión (Mpa)	0.4 \sqrt Compresión (Mpa)	Tensión directa (Mpa)	Tensión indirecta (Mpa)	0.7 \sqrt Compresión (Mpa)
T10	120	32.97	4.02	6.98	4.59	2.30	3.16	3.39	4.02
	150	29.93	3.83	7.20	4.38	2.19	3.62	2.79	3.83
	180	34.12	4.09	7.25	4.67	2.34	3.42	3.45	4.09
	300	32.51	3.99	7.23	4.56	2.28	2.56	4.86	3.99
FN 0.5%	120	31.89	3.95	7.26	4.52	2.26	3.08	2.75	3.95
	150	33.92	4.08	6.84	4.66	2.33	2.82	4.33	4.08
	180	24.57	3.47	7.63	3.97	1.98	2.57	3.88	3.47
	300	24.66	3.48	6.44	3.97	1.99	2.24	4.85	3.48
FN 1.5%	120	25.86	3.56	6.14	4.07	2.03	1.73	2.65	3.56
	150	37.02	4.26	6.62	4.87	2.43	2.38	3.40	4.26
	180	19.13	3.06	4.68	3.50	1.75	2.70	2.69	3.06
	300	23.66	3.41	4.06	3.89	1.95	2.43	2.67	3.41
MZ 2% FN 0.5%	120	29.92	3.83	7.16	4.38	2.19	3.28	2.66	3.83
	150	41.63	4.52	7.25	5.16	2.58	3.13	3.65	4.52
	180	32.72	4.00	6.84	4.58	2.29	3.33	3.85	4.00
	300	32.30	3.98	6.51	4.55	2.27	2.83	4.01	3.98

4.3.2.6 Resistencia a la tensión por adherencia

La prueba de adherencia arrojó resultados cualitativos de acuerdo a su número y tipo de falla al momento de realizar la prueba con el equipo de *Pull-Off*. La mayoría de las pruebas presentó una falla por su resistencia a la tensión en las mezclas de mortero, lo cual significa que las distintas mezclas tuvieron una buena adherencia como material de reparación o revestimiento con el sustrato de concreto. En la Tabla 4.19 siguiente se muestra el tipo y número de falla que se presenta al momento de realizar la prueba, y en la Figura 4.29 el esfuerzo de tensión por adherencia calculado por el equipo de prueba.

Tabla 4.19 Resultados cualitativos de la resistencia a la tensión por adherencia

Resistencia a la adherencia por su tipo de Falla								
Edad Mezcla	T10		FN 0.5%		FN 1.5%		MZ 2% FN 0.5%	
	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla
120	4	Resistencia a la tensión	2	Por adhesivo epóxico	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión
180	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia
	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	-	-	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	-	-	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión

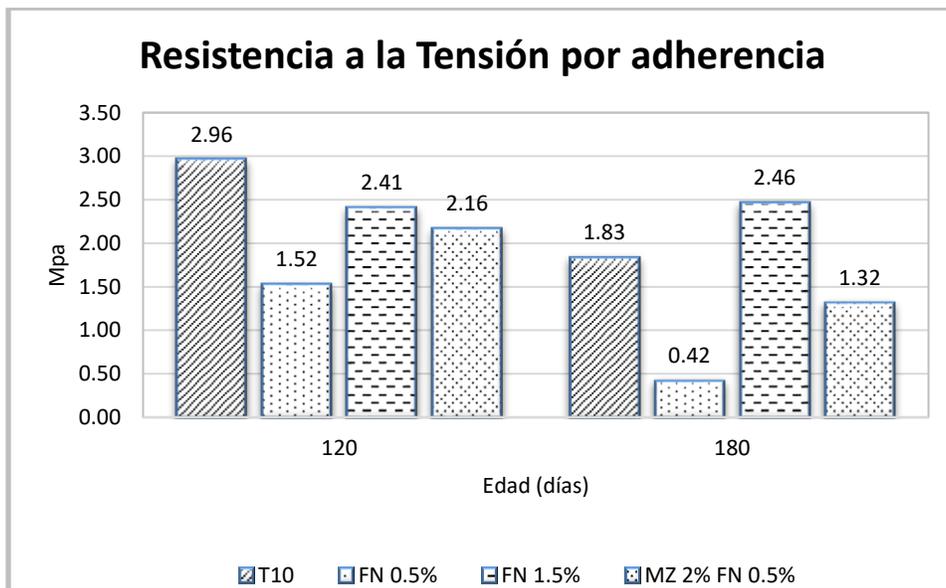


Figura 4.29 Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a la edad de 120 y 180 días

4.3.3 Pruebas por durabilidad

Los resultados de los ensayos para evaluar la durabilidad de las muestras se presentan a continuación.

4.3.3.1 Ataque por sulfatos

El ensayo de ataque por sulfatos consistió en tres pruebas principalmente, teniendo dos pruebas de durabilidad (Resistividad Eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico) y una más de pérdida de masa en donde el principal objetivo es conocer si los morteros se acercan a su máximo estado de servicio, es decir, si al final de los 5 ciclos los morteros en contacto con los sulfatos necesitan un tratamiento para repararlo o llegan a su total deterioro. Se dice que el espécimen alcanzó su estado máximo de servicio al tener una pérdida de masa del 5%. Los resultados se obtuvieron a la edad de 90 y 180 días.

Los resultados para los 90 días se presentan en los siguientes gráficos de las Figuras 4.30 a la 4.34.

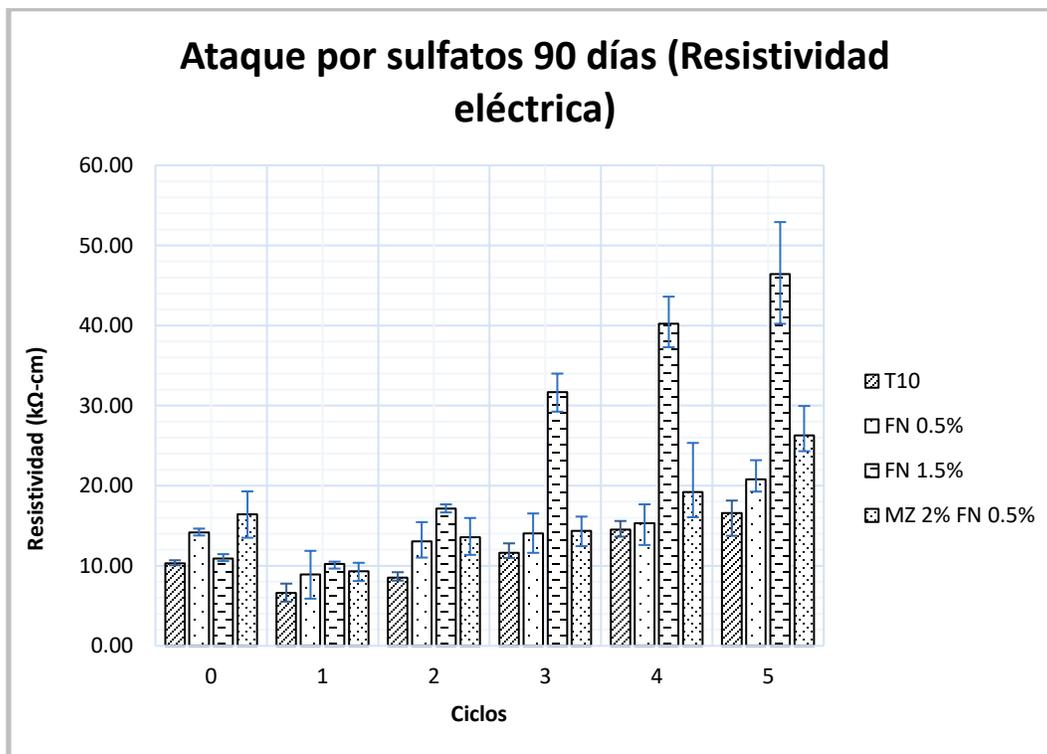


Figura 4.30 Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días

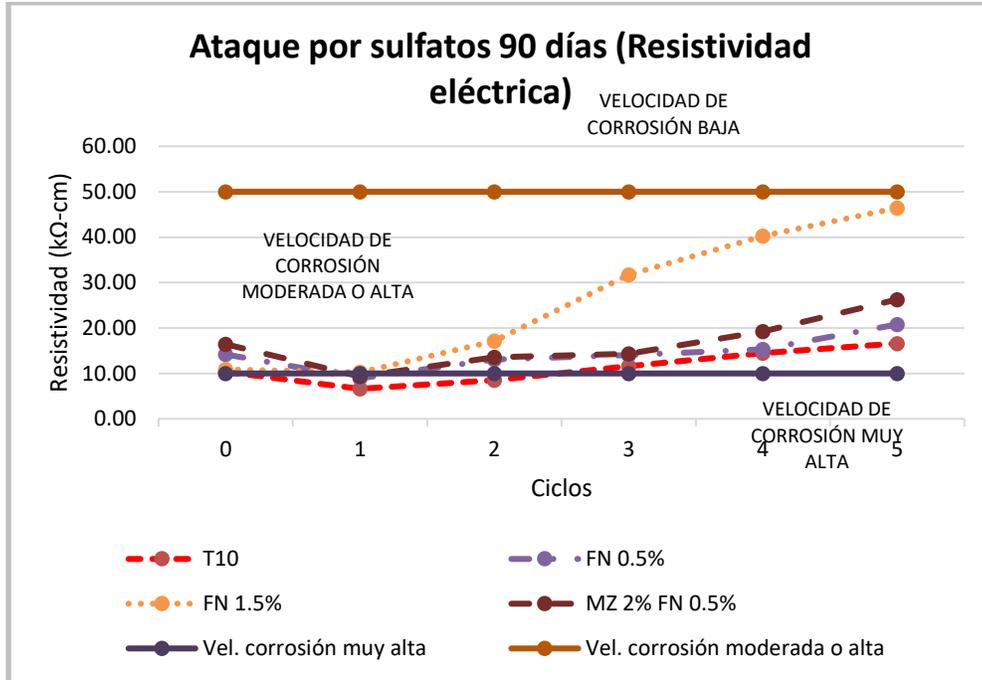


Figura 4.31 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días

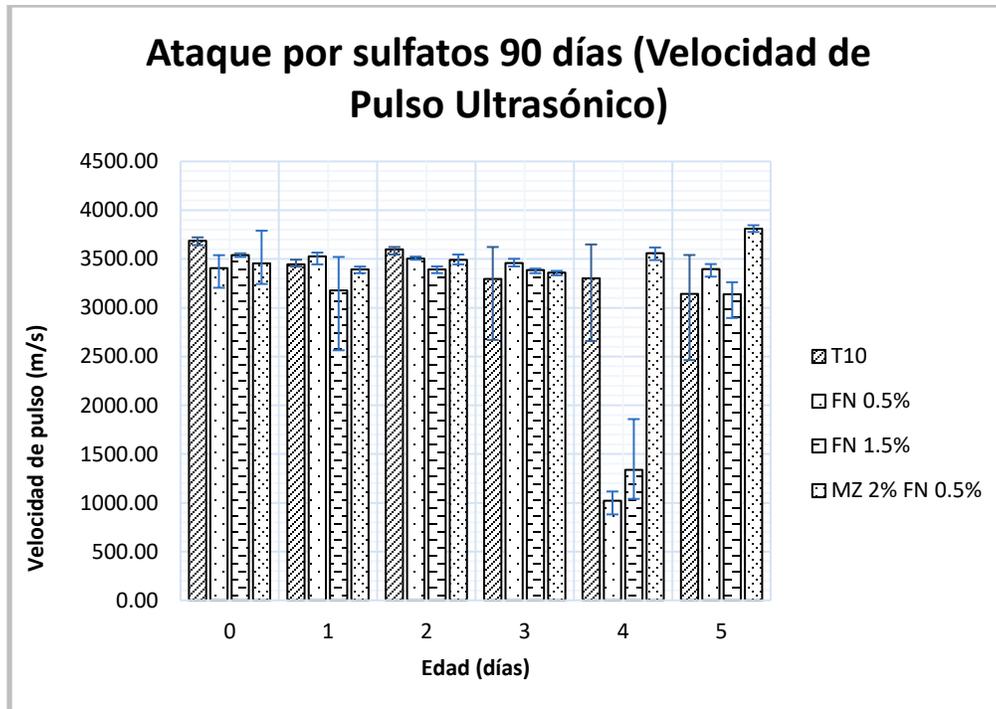


Figura 4.32 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días

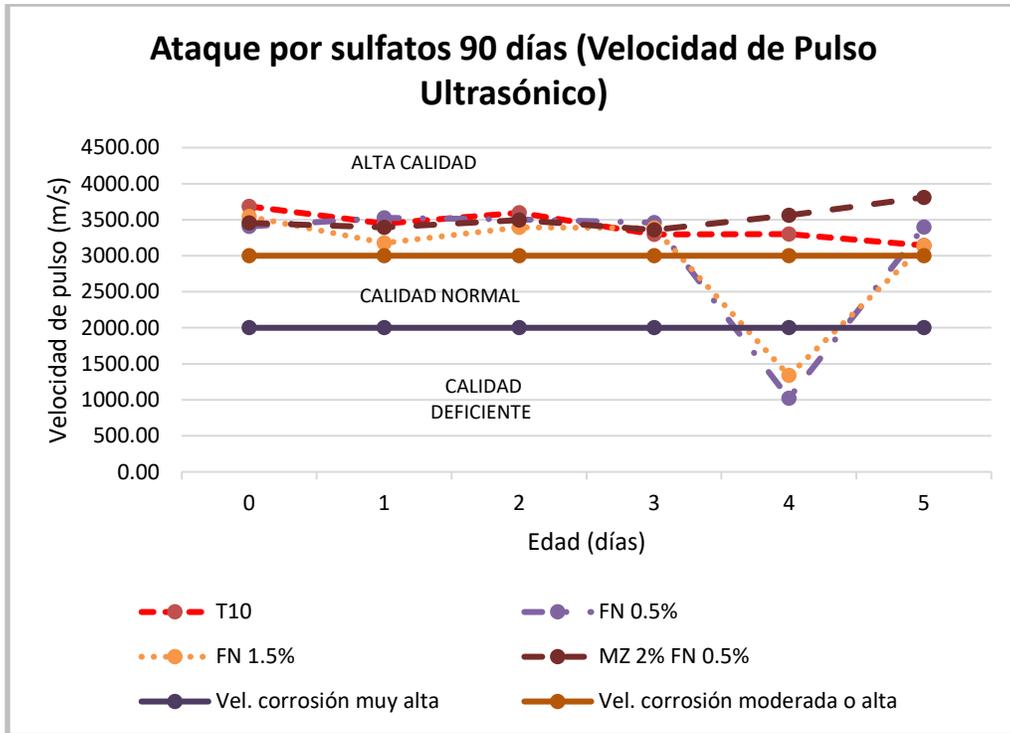


Figura 4.33 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días

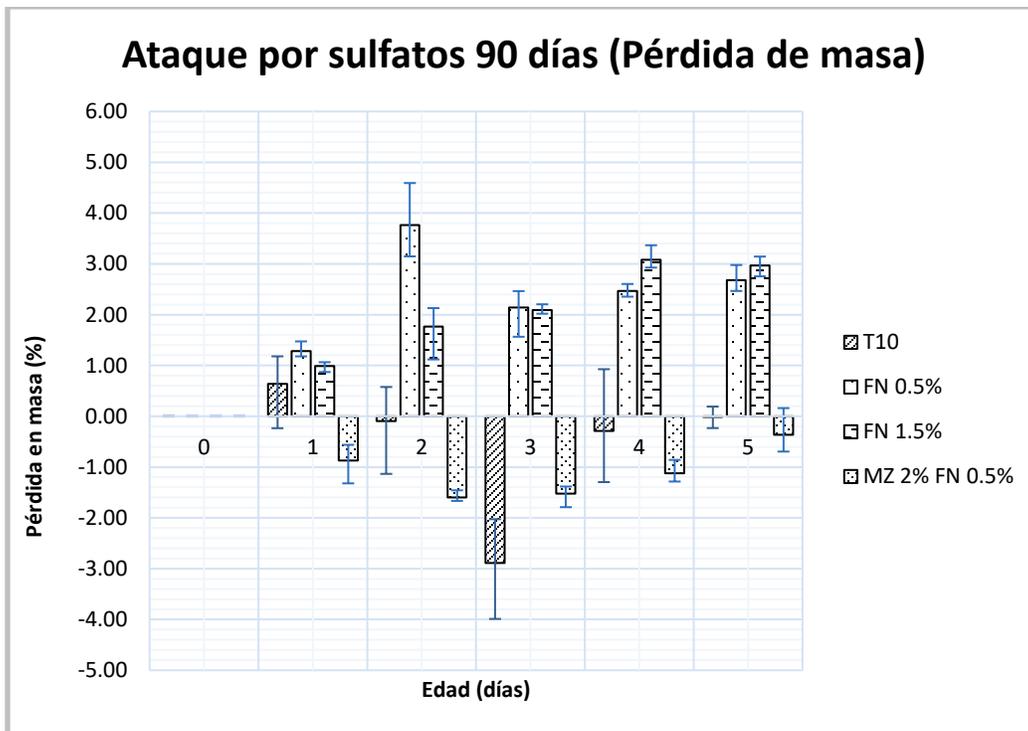


Figura 4.34 Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días

Las Figuras 4.30 y 4.31, muestran como los valores de resistividad eléctrica van aumentando en las distintas mezclas hasta llegar al último ciclo de prueba, es decir que los poros internos de la matriz de mortero se llenan de sulfato lo que hace que la resistividad eléctrica aumente. Las cuatro mezclas en estudio presentaron al final de la prueba un riesgo de velocidad de corrosión alto o moderado siendo la mezcla MZ 2%-FN 0.5% la que alcanzo valores de resistividad de hasta 46.44 kΩ-cm. Todas las mezclas con sustituciones sobrepasaron a la mezcla T10, siendo esta la de mayor peligro de corrosión.

Los morteros atacados por sulfatos no tuvieron problema cuando se realizó la prueba de velocidad de pulso ultrasónico ya que los resultados son muy estables y durante todos los ciclos de prueba se encontraron en la zona de alta calidad según la clasificación de la Red DURAR (2000), rebasando los 3000 m/s de velocidad de propagación de la onda ultrasónica (Figuras 4.32 y 4.33). Como se puede observar en las dos gráficas (Figuras 4.32 y 4.33), en el ciclo 4 de la prueba las mezclas FN 0.5% y FN 1.5% presentaron valores pequeños y muy diferentes en comparación con las otras mezclas, esto se debió a una falla directa en el equipo.

En la figura 4.34 se puede observar que la pérdida de masa se presenta únicamente en las mezclas FN 0.5% y FN 1.5%, siendo la FN 1.5% la de mayor pérdida de masa, alcanzando un valor del 2.97% solo por encima de la mezcla FN 0.5%, pero sin alcanzar su máximo estado de servicio permisible (5%). Durante la prueba las dos mezclas restantes T10 y MZ 2%-FN 0.5% ganaron masa en un porcentaje menor al 0.5% al llegar al quinto ciclo.

A continuación, se presenta los gráficos de los resultados obtenidos para los 180 días los cuales se encuentran en las Figuras 4.35 a la 4.39.

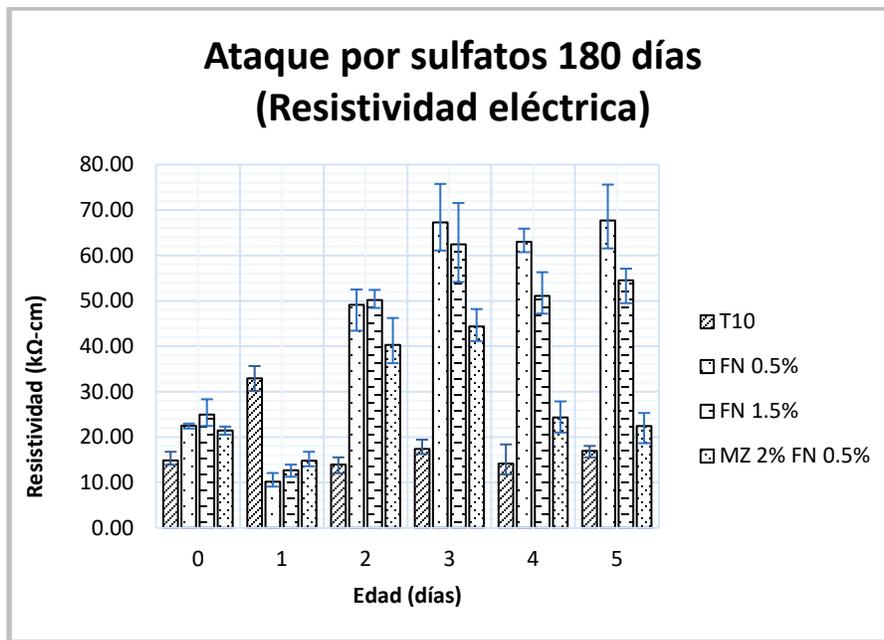


Figura 4.35 Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días

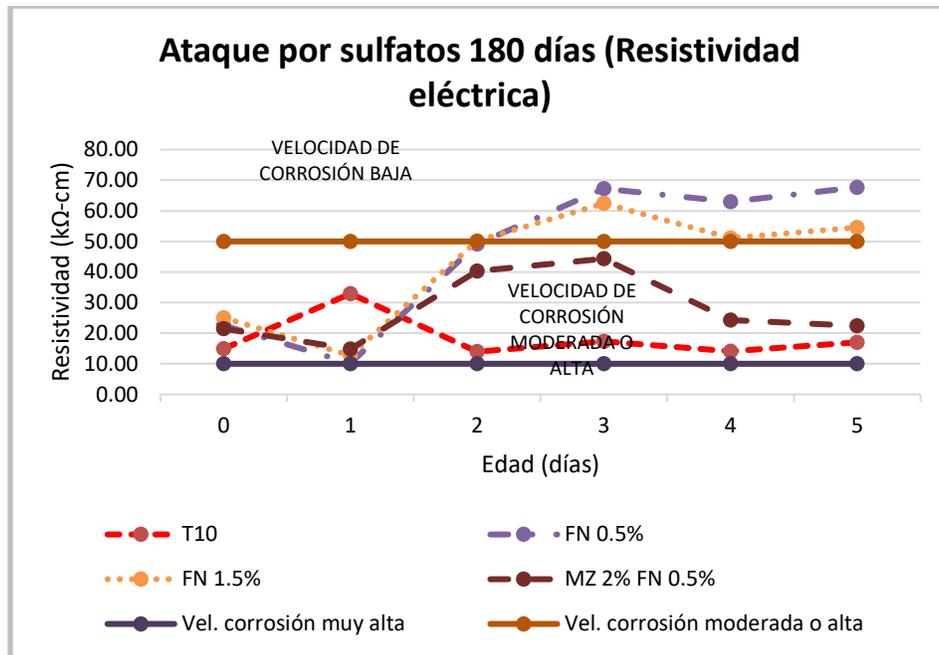


Figura 4.36 Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días

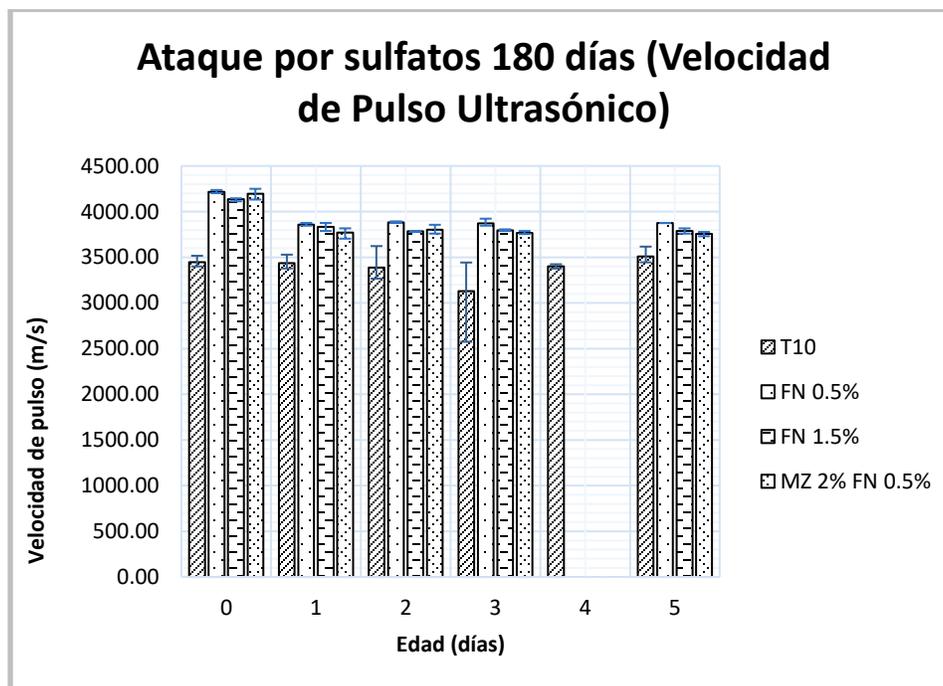


Figura 4.37 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días

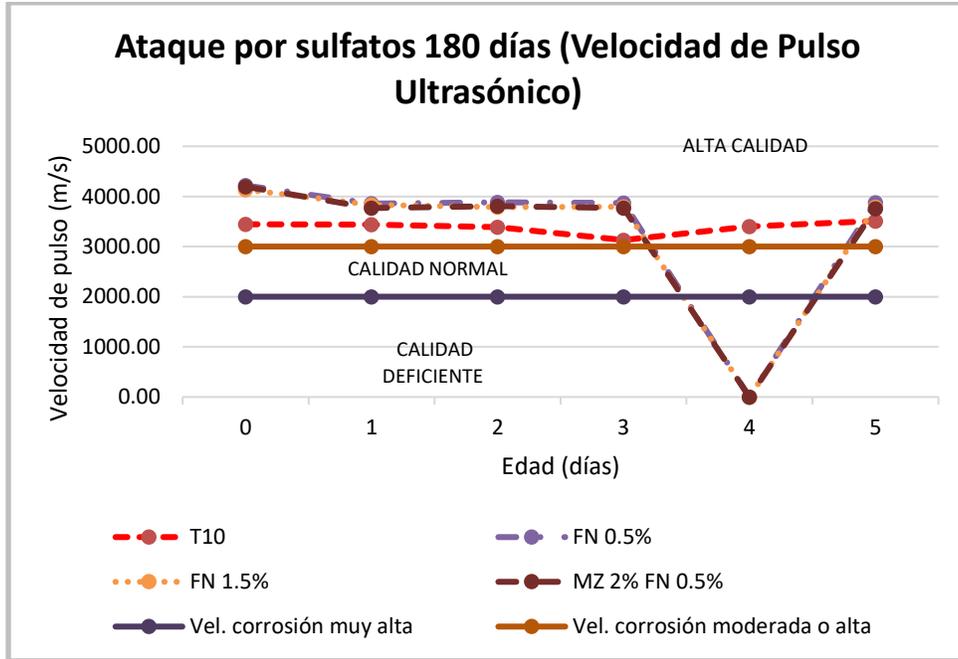


Figura 4.38 Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días

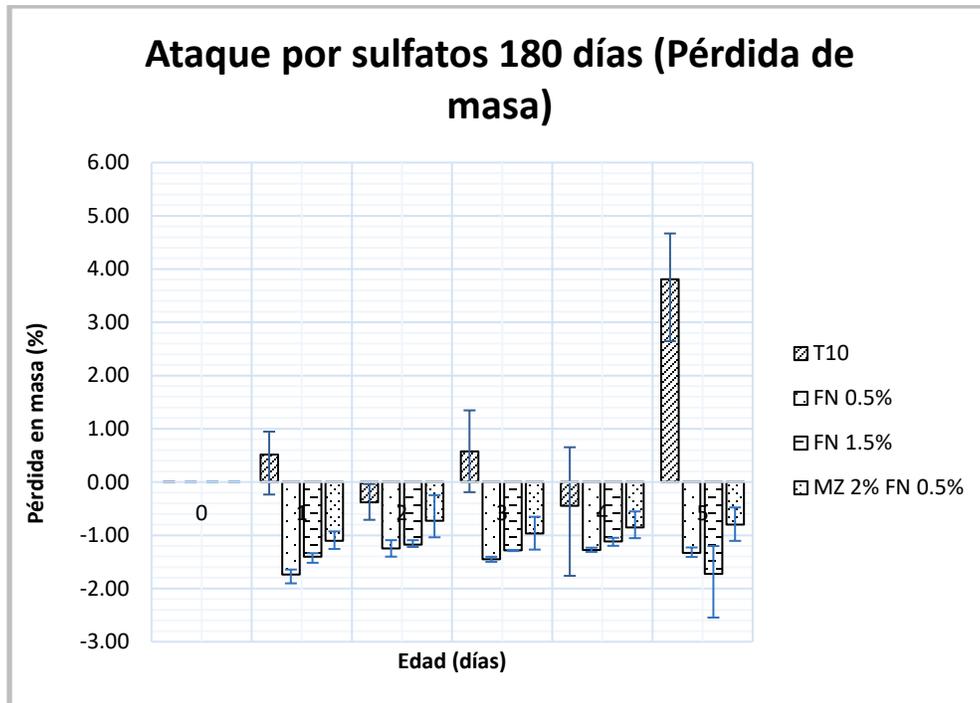


Figura 4.39 Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días

Como se observa en las Figuras 4.35 y 4.36, los valores de resistividad eléctrica van aumentando en las distintas mezclas hasta llegar al tercer ciclo de prueba y a partir de este ciclo los valores decrecen, esto quiere decir que en los últimos dos ciclos de ataque por sulfatos la velocidad de corrosión disminuye, sin embargo, el material no logra reponerse a tal efecto de corrosión si existiera. La FN 0.5% y FN 1.5% alcanzan un bajo riesgo de velocidad de corrosión al quinto ciclo de prueba, mientras que la mezcla T10 es la más desfavorable con un riesgo de velocidad de corrosión alta, de acuerdo a las especificaciones de la Red DURAR (2020).

Las tres mezclas con sustituciones orgánicas FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN0.5% arrojaron valores mayores de velocidad de pulso ultrasónico en comparación con la mezcla T10 y adquirieron un criterio de calidad alta durante los 5 ciclos de ataque por sulfatos a los 180 días (Figuras 4.37 y 4.38). La mezcla FN 0.5% tuvo un mejor comportamiento al ataque por sulfatos y esto se pudo observar a lo largo de la prueba, ya que los cubos en la parte superficial no presentaban de manera visual ninguna fisura en su estructura. Al quinto ciclo de prueba la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% fue la que presentó desprendimiento de la capa superficial en los cubos, pero sin que el sulfato afectara en su forma original.

La Figura 4.39 muestra la pérdida de masa de las distintas mezclas en estudio en donde podemos observar que la mezcla T10 fue la única que presentó pérdida de masa, alcanzando cerca de un 3.81%, el máximo porcentaje obtenido en esta prueba. Por el contrario, las mezclas de FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% ganaron masa durante el transcurso de toda la prueba.

4.3.3.2 Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros

La edad de prueba es un factor fundamental en los resultados para conocer el tipo de permeabilidad a la que estará expuesta la estructura de concreto o mortero. Para la permeabilidad rápida de cloruros se propuso realizar la prueba a la edad de 180 días obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días

Permeabilidad rápida de cloruros (180 días)			
Mezcla	No. de espécimen (parte central)	Coulombs	Tipo de permeabilidad
T10	1	2465	Moderada
	2	2169	Moderada
	3	2091	Moderada
FN 0.5%	1	1835	Baja
	2	2335	Moderada
	3	1627	Baja
FN 1.5%	1	1797	Baja
	2	1443	Baja
	3	1483	Baja
MZ 2%-FN 0.5%	1	1583	Baja
	2	1510	Baja
	3	1521	Baja

Como se puede observar en la tabla 4.20 la prueba de permeabilidad a 180 días arrojó resultados similares en las distintas mezclas. La mezcla testigo (T10) tuvo un riesgo de penetración de cloruros moderada y presentando valores de carga eléctrica transferida superiores a las mezclas FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5%, las cuales presentaron un tipo de permeabilidad baja en promedio.

4.3.3.3 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados

Los resultados de la resistencia fueron obtenidos después de cumplir cada espécimen una edad de 180 días para las distintas mezclas en estudio, para posteriormente ser sometidas a 14 ciclos de congelación y deshielo acelerados. Los resultados se muestran en las Figuras 4.40 y 4.41.

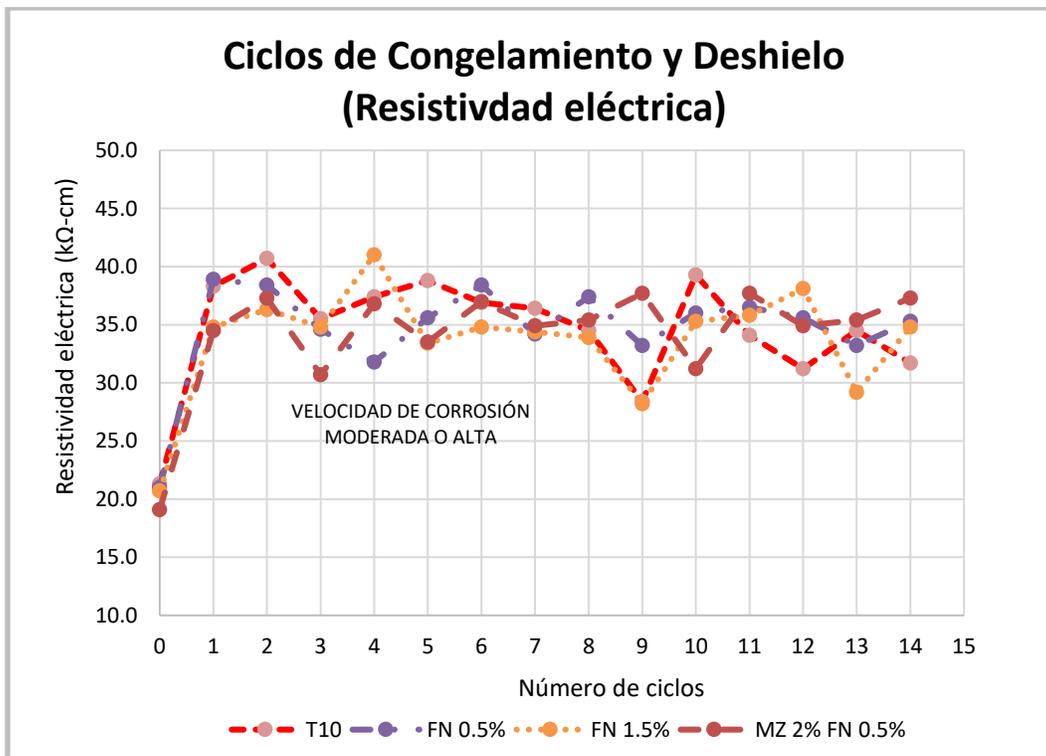


Figura 4.40 Resultados de Resistividad Eléctrica (RE) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados

De los resultados de resistividad eléctrica se observa en la Figura 4.40 que al inicio de la prueba de congelamiento y deshielo en el ciclo 0 presenta un valor por debajo de los demás ciclos y conforme transcurren los ciclos los valores de la RE de cada mezcla tienden a decrecer. De acuerdo con las especificaciones de la normativa vigente de RE, las cuatro mezclas se consideran con un riesgo de “velocidad de corrosión moderada o alta”.

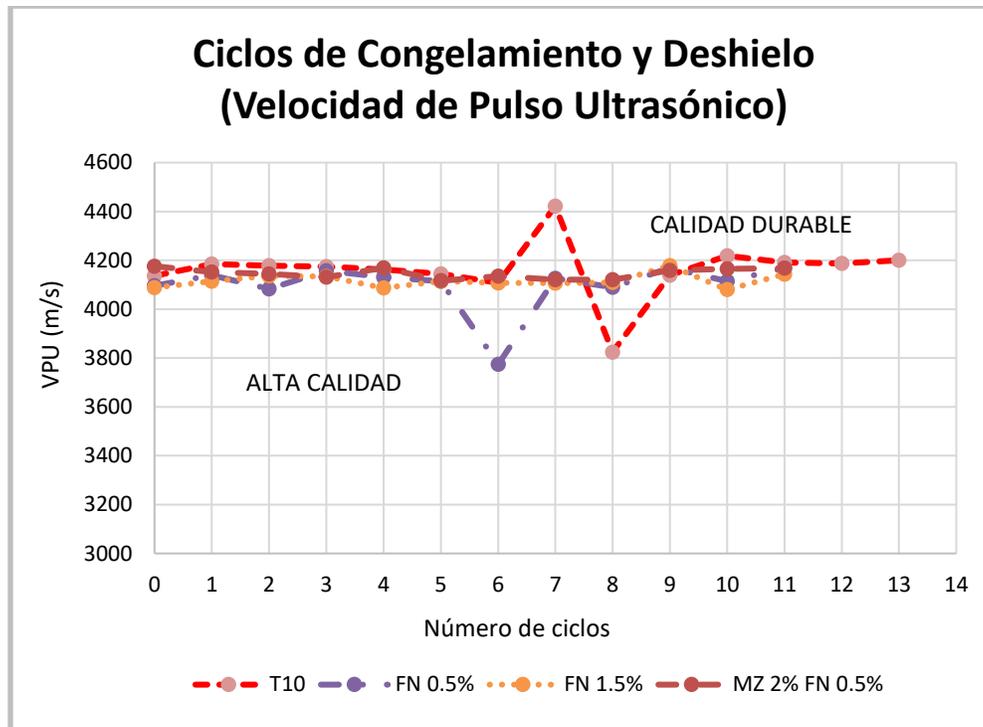


Figura 4.41 Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados

Con respecto a los resultados de VPU (Figura 4.41), las variaciones que se observan del ciclo 6 al 9 se debieron a la sensibilidad del equipo y no a una característica propia del material. Es importante mencionar que en esta prueba no existe una variación considerable en el ciclo cero con los demás. De acuerdo con la Red DURAR (2020), las cuatro mezclas se consideran como “calidad durable”.

Es importante realizar el cálculo de módulo de elasticidad dinámico y un factor de durabilidad, los cuales no se calcularon debido a que después de consultar literatura de ensayos de esta índole se llegó a la conclusión de que estos parámetros dan resultados estables en 100 o más ciclos de congelamiento y deshielo. Pero sin embargo se calculó un número de ciclos necesarios (Tabla 4.21), extrapolando la tendencia del comportamiento de cada mezcla de mortero, para que la RE llegue a una lectura de 0 k Ω -cm y considerando así la falla total del material.

Tabla 4.21 Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando RE=0.

Mezclas	N° de ciclos para RE = 0 K Ω -cm
T10	75
FN 0.5%	231
FN 1.5%	172
MZ 2% FN 0.5%	309

Considerando los resultados de la tabla 4.21 anterior, se concluye que la mejor mezcla es la de MZ 2%-FN 0.5% ya que requiere un mayor número de ciclos en comparación con las otras dos mezclas para que llegue a su falla total.

4.3.3.4 Estimación de la profundidad de carbonatación

Para conocer la constante característica de carbonatación, mediante la cual se puede realizar una predicción de la velocidad de carbonatación se optó por realizar un promedio del valor de la constante por edad (90, 135 y 180), esto debido a que la predicción de la profundidad de carbonatación se da a partir del producto de la raíz cuadrada del tiempo medido en años, y la constante de la primera edad de prueba, la cual debe coincidir con las demás edades posteriores por su comportamiento lineal ascendente que se presenta al momento de calcular su predicción de carbonatación en el material. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.42.

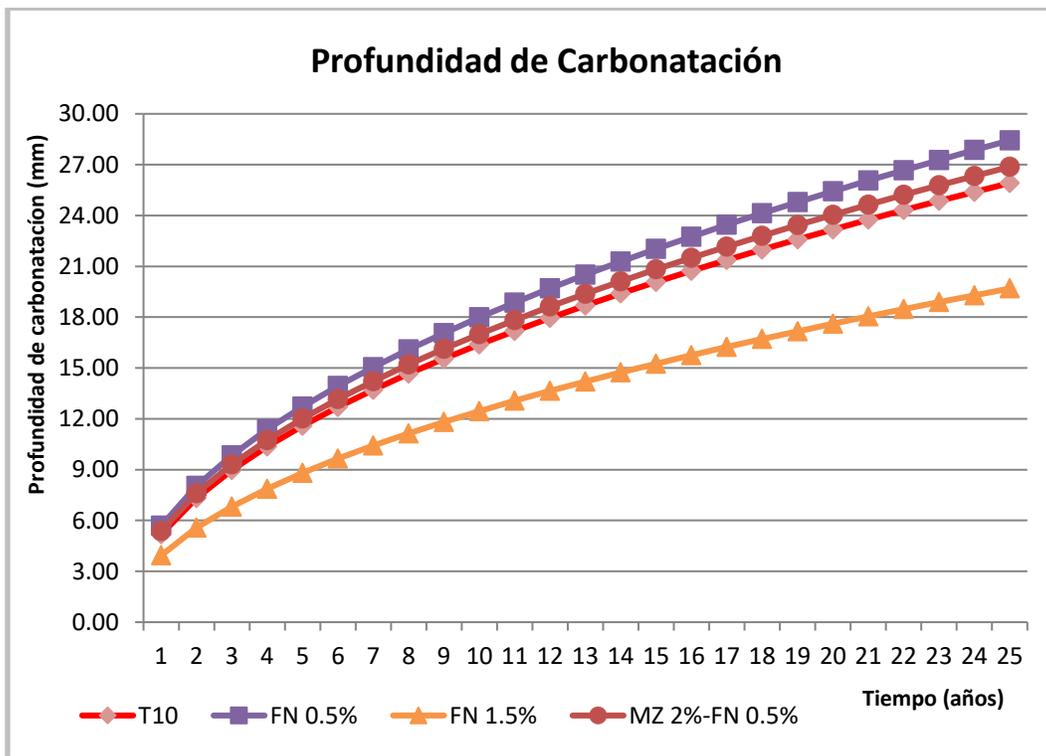


Figura 4.42 Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 25 años

Las mezclas con sustitución de fibra de nopal (FN 0.5% y FN 1.5%), presentaron profundidades de carbonatación en un rango de 2.5 a 4.3 mm para FN 0.5%, y de 1.8 a 3.0 mm para FN 1.5%, mientras que la mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5% presentó profundidades de carbonatación de 2.1 a 4.3 mm y la mezcla testigo T10 de alrededor de 2.5 a 3.5 mm.

Con los resultados de estos valores de profundidad de carbonatación y calculando las constantes de carbonatación tenemos que la mezcla T10 estaría alcanzando

una profundidad de 25.92 mm a los 25 años de exposición, la mezcla FN 0.5% una profundidad de 28.43 mm, la mezcla FN 1.5% una profundidad de 19.69 mm y la mezcla MZ 2%-FN 0.5% una profundidad de carbonatación de 26.88 mm

De acuerdo a la Red DURAR (2020), los valores de la constante de carbonatación "XCARB" es de 2 a 3 mm/año^{0.5}, estos valores pueden considerarse como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores de "XCARB" superiores a los 6 mm/año^{0.5}, indican concretos/morteros de muy baja resistencia. Por lo tanto, todas las mezclas se clasifican como morteros de resistencia media a la carbonatación según los valores iniciales observados en la gráfica de la Figura 4.2.

4.3.3.5 Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero

La determinación de la absorción capilar en los especímenes cúbicos para cada mezcla de mortero en estudio se realizó en dos edades de prueba. La primera edad fue a los 90 días después de la elaboración de las mezclas. Como ejemplo del cálculo realizado se presenta la Tabla 4.22 la cual contiene datos de 1 de los 5 cubos empleados (mezcla FN 0.5%) y valores calculados después del ensayo de Fagerlund (1982). El desarrollo de cálculo que a continuación se presenta se aplicó para las mezclas T10, FN 0.5%, FN 1.5%, MZ 2%-FN 0.5% y para cada uno de los 5 especímenes sometidos a la prueba. Al final se realizó un promedio de los coeficientes obtenidos por espécimen de cada mezcla y se ilustran en las Figuras 4.44-4.47.

Tabla 4.22 Serie de datos para el primer espécimen cubico de la mezcla FN 0.5%.

FN 0.5% 1/5	Wo (Kg) = 0.2537		Área {Ao} (m ²) = 0.00251	
Tiempo (s)	Raíz cuadrada (s) ²	altura (z) (m)	Wt (Kg)	(Wt - Wo)/Ao (kg/m ²)
0	0.00	0.0000	0.2537	0.00
300	17.32	0.0499	0.2541	0.16
600	24.49	0.0499	0.2543	0.24
900	30.00	0.0499	0.2543	0.24
1800	42.43	0.0499	0.2547	0.40
3600	60.00	0.0499	0.2551	0.56
7200	84.85	0.0499	0.2556	0.76
14400	120.00	0.0499	0.2563	1.04
21600	146.97	0.0499	0.2569	1.27
86400	293.94	0.0499	0.2584	1.87
172800	415.69	0.0499	0.2594	2.27
259200	509.12	0.0499	0.2596	2.35
345600	587.88	0.0499	0.2600	2.51
432000	657.27	0.0499	0.2604	2.67
518400	720.00	0.0499	0.2606	2.75
604800	777.69	0.0499	0.2608	2.83
691200	831.38	0.0499	0.2611	2.95

777600	881.82	0.0499	0.2612	2.99
864000	929.52	0.0499	0.2614	3.07
950400	974.88	0.0499	0.2616	3.15
1036800	1018.23	0.0499	0.2617	3.19
1123200	1059.81	0.0499	0.2618	3.23
1209600	1099.82	0.0499	0.2618	3.23

De la Tabla 4.24 se obtiene una gráfica con 2 de las columnas de dicha tabla (Véase la Figura 4.43), colocando los valores de la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas y el valor de la columna $(W_t - W_0)/A_0$ en el eje de las ordenadas. En la figura 4.43 se observan dos pendientes: la primera que forman los primeros puntos y que representa la absorción del agua por la muestra y la segunda la forman los puntos con valores muy parecidos entre sí de $(W_t - W_0)/A_0$ con diferencia de un día, la cual representa la saturación del mismo. Al ser menos pronunciadas estas pendientes y asemejar una curva se interpreta que el material no se satura con rapidez y presenta buena resistencia a la penetración del agua y cualquier agente disuelto en ella, por lo tanto, tiene un bajo porcentaje de porosidad efectiva.

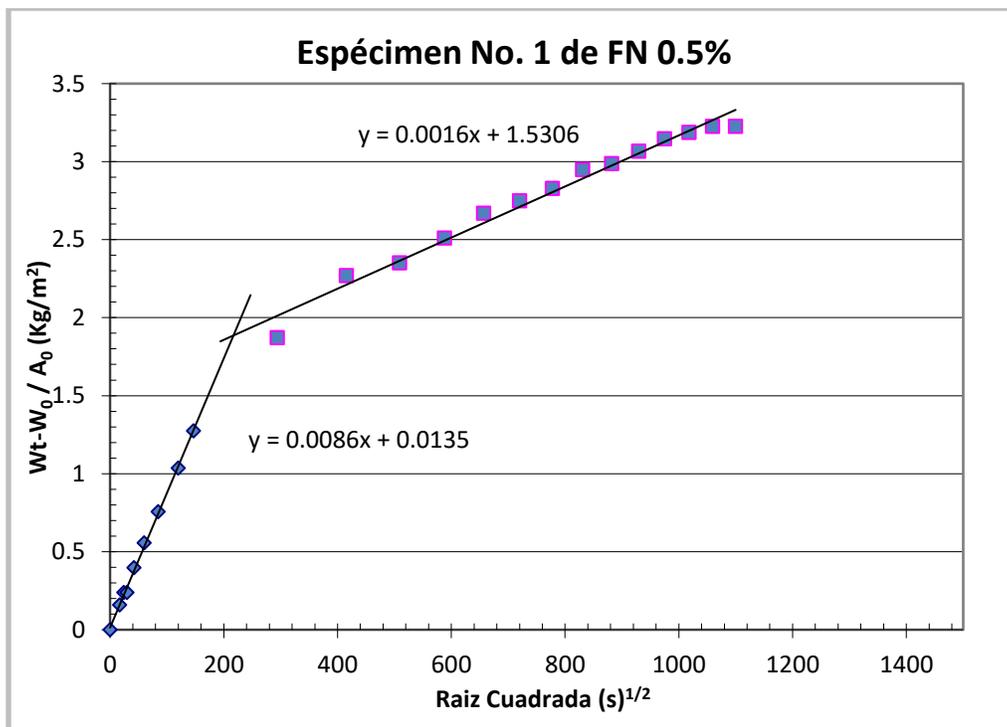


Figura 4.43 Prueba de absorción capilar para un espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%

El cálculo del coeficiente de absorción capilar (k) se da a partir del cruce que tienen las dos líneas de tendencia que presentan el cambio de comportamiento de la absorción del espécimen, es decir, se requiere conocer las coordenadas del punto donde se intersectan las dos líneas, es por eso que se tienen dentro del gráfico una ecuación para cada línea que describe su pendiente, mediante las cuales se puede obtener la raíz cuadrada del tiempo en "x" y la $(W_t - W_0)/A_0$ en "y" como se muestra a continuación:

El sistema de ecuaciones es:

$$y = 0.0086x + 0.0135$$

$$y = 0.0016x + 1.5306$$

Igualando la variable "y" de las dos ecuaciones:

$$0.0086x + 0.0135 = 0.0016x + 1.5306$$

Despejando la variable "x":

$$0.007x = 1.5171$$

$$x = 1.5171/0.007$$

$$x = 216.73$$

$$(\sqrt{t} = 216.73 \text{ s}^{1/2})$$

Sustituyendo "x" en una de las dos ecuaciones originales:

$$y = 0.0086 (216.72) + 0.0135$$

$$y = 1.88$$

$$((W_t - W_0)/A_0 = 1.88 \text{ kg/m}^2)$$

Por lo tanto, se calcula el valor del coeficiente de absorción capilar (k) como:

$$k = \frac{216.73}{1.88} = 0.0087 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^{1/2}}$$

El cálculo de la resistencia a la penetración (m), se realiza con los datos de la tabla de cálculo correspondientes al tiempo y altura (cuando z representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo "t") del punto de quiebre, donde se intersectan ambas pendientes. Los demás coeficientes requeridos obedecen a las ecuaciones siguientes:

$$t_n = (\sqrt{t})^2 = (216.73)^2$$

$$t_n = 46971.89 \text{ s}$$

Resistencia a la penetración (m):

$$m = \frac{46971.89}{0.0499^2} = 18,864,137.09 \text{ s/m}^2$$

Porosidad efectiva (ϵ_e):

$$\epsilon_e = \frac{0.0087 * \sqrt{18,864,137.09}}{1000} = 0.0377 \text{ m/s}^2$$

$$\varepsilon_e = 3.78 \%$$

Tomando en cuenta el valor anterior de m , se calcula la absorción capilar como:

$$s = \frac{1}{\sqrt{m}} = \frac{1}{\sqrt{18,864,137.09}} = 0.00023 \text{ m/s}^{1/2}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de cada una de los especímenes y promediando estos valores se obtienen resultados gráficos presentados en las siguientes figuras por edad de prueba y por mezcla.

En la Figura 4.44 se da a conocer la absorción capilar obtenida en las dos edades de prueba.

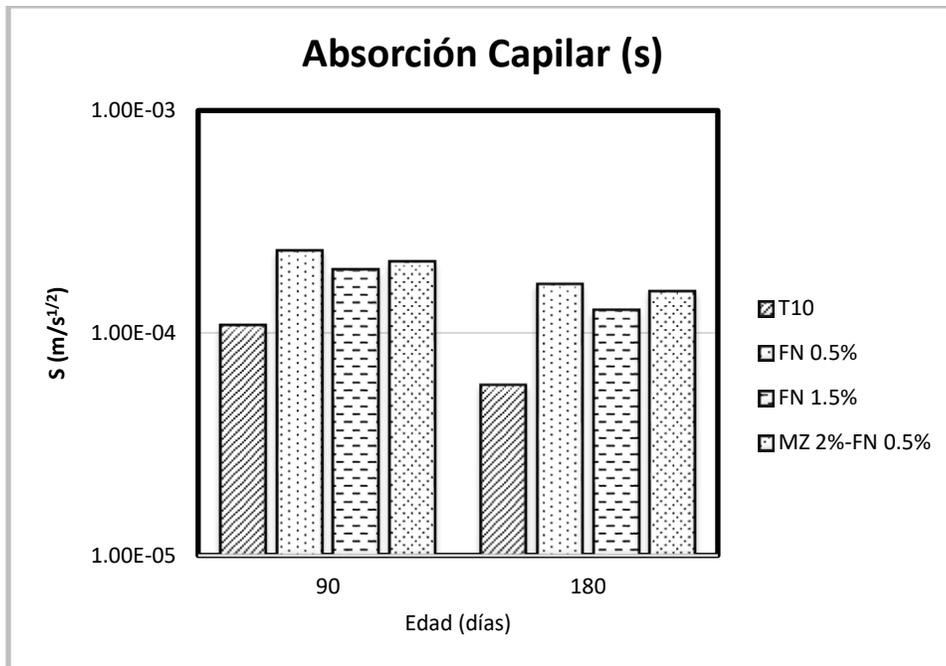


Figura 4.44 Resultados de absorción capilar (s) a la edad de 90 y 180 días

Realizando una comparación entre las mezclas, podemos observar en la figura 4.44 que el mortero con sustitución de FN 0.5% presenta una mayor absorción de agua por los poros capilares, ligeramente mayor a las otras dos mezclas con sustitución (FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5%) y superando en las dos edades todas las mezclas al mortero T10. La Red DURAR (2020), especifica que valores menores de absorción de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ es apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$.

Los rangos en que se encuentran las mezclas elaboradas son: con el valor más alto a 90 días de $1.08 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla T10; $2.34 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla FN 0.5%; $1.92 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla FN 1.5% y finalmente un valor de $2.09 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$. Las Figuras 4.45-4.47 muestran los valores promedios obtenidos en

las dos edades de prueba de la resistencia a la penetración (m), el coeficiente de absorción capilar (k) y la porosidad efectiva (ϵ_e).

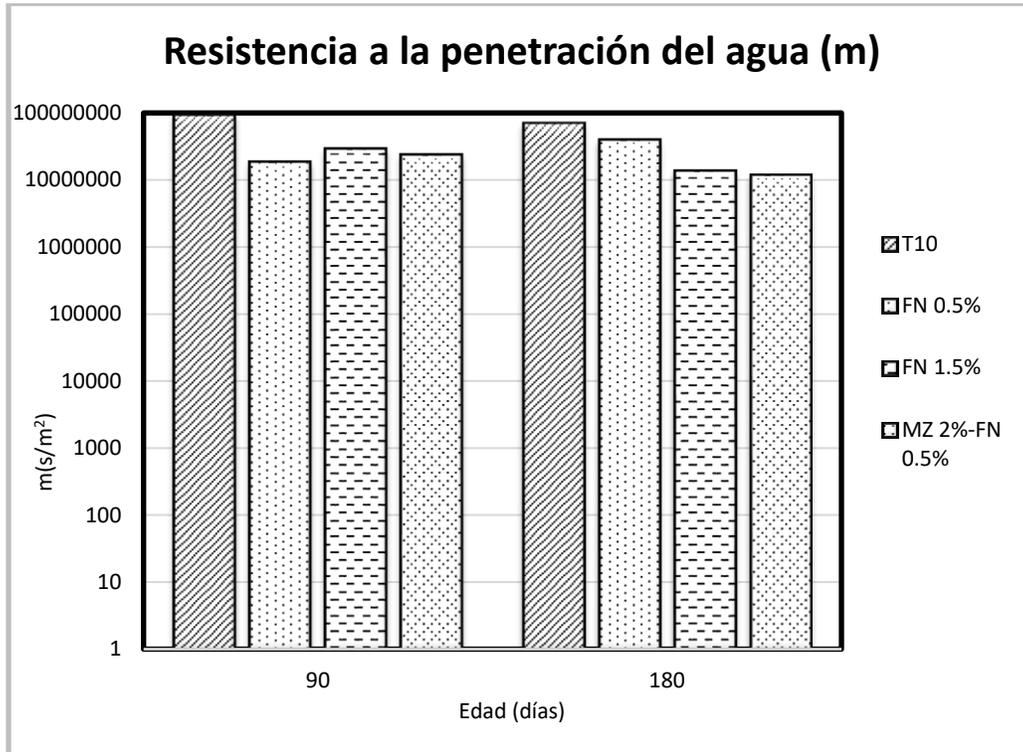


Figura 4.45 Resultados de la resistencia a la penetración del agua (m) a la edad de 90 y 180 días

En la Figura 4.45, se puede observar la resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla T10 lo cual significa que la porosidad de las muestras de T10 es menor y por consiguiente su valor de absorción. La mezcla FN 0.5% mejora y aumenta la resistencia a la penetración del agua a la edad de 180 días y es la que se encuentra por debajo de la mezcla T10. La mezcla MZ 2%-FN 0.5% es la de valor promedio más bajo, reflejando más porosidad y absorción en su estructura.

Teniendo como base los valores del coeficiente de absorción capilar, se obtuvieron los valores de la Figura 4.46, la cual contiene resultados promedio obtenidos para la porosidad efectiva de las 4 mezclas. De acuerdo con la Red DURAR (2020), los valores menores al 10% de porosidad indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10% y 15% indican un concreto de calidad moderada, y un concreto >15% de porosidad indican un concreto de durabilidad inadecuada. Los resultados de porosidad se pueden observar en la Figura 4.7

Con base en estas especificaciones se puede concluir que la mezcla T10 y las mezclas con sustitución de FN y MZ son de alta durabilidad y buena calidad, quedando todos los valores de las mezclas debajo del 10% marcado.

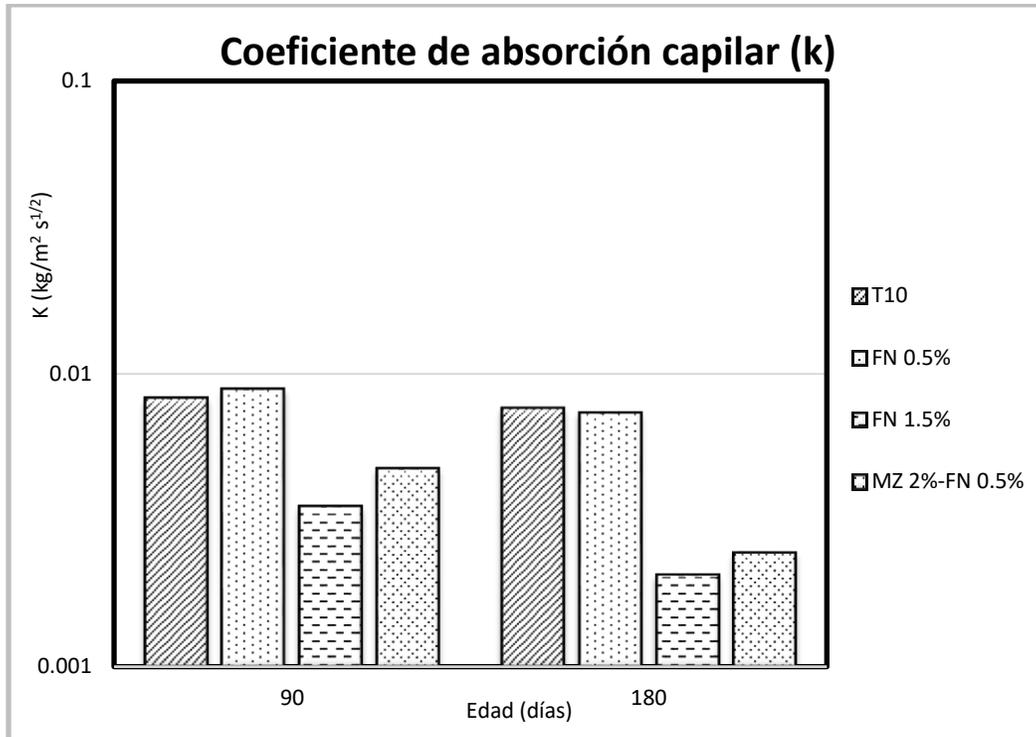


Figura 4.46 Resultados de absorción capilar (k) a la edad de 90 y 180 días

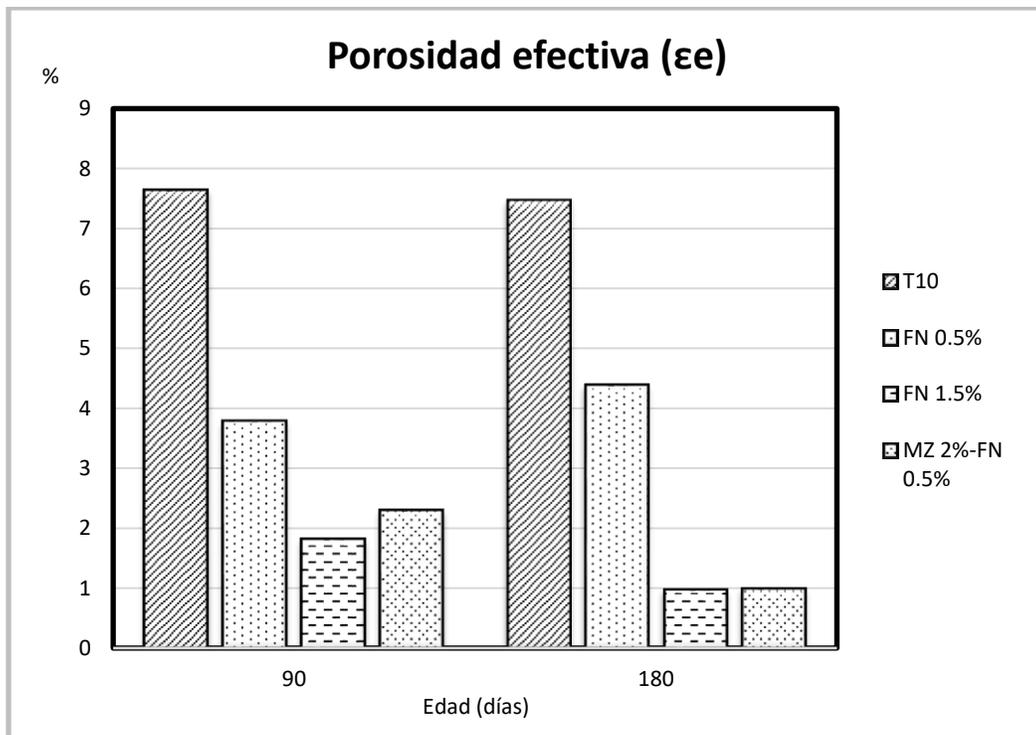


Figura 4.47 Resultados de Porosidad efectiva (ϵ_e) a la edad de 90 y 180 días

4.3.3.6 Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos)

Después de hervir las muestras para cada una de las mezclas y de esa manera obtener la porosidad total, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días

% Porosidad total		
Mezcla	Edad de Prueba (días)	
	90	180
T10	12.78	15.88
FN 0.5%	10.84	10.13
FN 1.5%	8.16	5.22
MZ 2% - FN 0.5%	8.12	6.41

Los resultados de la Tabla 4.23, muestran valores de porosidad total menores en las mezclas que cuentan con sustituciones del material cementante, esto se interpreta como una mejor resistencia a la degradación por penetración de agentes degradantes agresivos y una mejor respuesta en la durabilidad, así como en la calidad en su matriz cementicia.

La FN 1.5% presentó la menor porosidad total en su edad tardía seguido de la mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5%, por lo que se consideran como materiales de buena calidad y compacidad según las especificaciones de la red DURAR (2020). La mezcla de FN 0.5% sobrepasa un valor de porosidad total de 10% por lo que se considera como un material de moderada calidad y por último la mezcla T10, siendo esta la más desfavorable con mayor porcentaje de poros en su estructura y con una durabilidad inadecuada.

4.4 Discusión de resultados

Recopilando los resultados de las diferentes pruebas que se realizaron a las distintas mezclas en estudio se tienen las tablas siguientes.

4.4.1 Pruebas realizadas al mortero fresco

De acuerdo a los resultados condensados en la Tabla 4.24, las mezclas con adiciones orgánicas funcionen adecuadamente como retardantes, mientras que la fluidez se encuentra dentro de los límites o ligeramente abajo.

Tabla 4.24 Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Tiempos de fraguado	Dentro de los límites permisibles - inicial = 150 min y final = 390 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 120 min y final = 1260 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 210 min y final = 1515 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 135 min y final = 1174 min

Fluidez	Por debajo del límite estándar - 99%	En el límite superior estándar - 115%	Sólo por debajo del límite estándar - 104%	Dentro del límite estándar - 112%
pH	Mezcla alcalina - pH = entre 12 y 14			
Elaboración de especímenes	Sin problemas significativos de exudación o de desmolde			
Cuantificación de especímenes elaborados	72 cubos de 5 x 5 cm, 20 briquetas, 20 prismas de 4 x 4 x 16 cm y 20 cilindros de 5 x 10 cm			

4.4.2 Pruebas no destructivas en el concreto endurecido

Sobre las pruebas no destructivas se obtuvieron los resultados resumidos en la Tabla 4.25.

- La densidad en las mezclas con sustituciones se encuentra en buenas condiciones y de calidad aceptable.
- En relación a la gravedad específicas las mezclas con adiciones densifican la matriz cementicia del mortero.
- Con la prueba de Resistividad Eléctrica la mezcla FN 1.5% es la que presentó una velocidad de corrosión baja.
- Con la Velocidad de Pulso Ultrasónico, el resultado arrojó en todos los casos que el mortero tiene una calidad durable.

Tabla 4.25 Resumen de resultados de pruebas no destructivas

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Densidad	Mayor densidad a los 300 días (2060 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Por debajo del T10 a los 300 días (2030 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Menor densidad a los 300 días (1970 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Por debajo de FN 0.5% a los 300 días (2010 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable
Gravedad específica	Menor gravedad específica a los 300 días = 1.88	Menor grav. específica en sustitución a los 300 días = 1.90 - Densifica la matriz cementicia del mortero	Mayor gravedad específica a los 300 días = 1.93 - Densifica la matriz cementicia del mortero	Grav. Específica a los 300 días = 1.91 - Densifica la matriz cementicia del mortero
Resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCE-2016)	RE (300 días) = 21.75 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta	RE (300 días) = 35.32 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta	RE (300 días) = 59.9 kΩ-cm Velocidad de corrosión baja	RE (300 días) = 29.12 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta
Velocidad de Pulso Ultrasónico (Red Durar,2000)	VPU (300 días) = 4309.8 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4172.25 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4150.6 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4062.4 m/s Mortero de calidad durable

4.4.3 Pruebas destructivas en el concreto endurecido

Como resultado de las pruebas destructivas se construyó la Tabla 4.26, mediante la cual se expresa lo siguiente:

- Los resultados a compresión mostraron que las mezclas tienen durabilidad y resistencia moderada. Las mezclas FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% presentaron los valores de módulo más altos.
- En la resistencia a la flexión, todas las mezclas superaron los límites especificados, sin embargo, las mezclas con aditivos orgánicos disminuyeron su resistencia en comparación la mezcla testigo. Las mezclas FN 0.5% y MZ 2%-FN 0.5% presentaron los valores de módulo más altos.
- La tensión directa tuvo un buen comportamiento, ya que superó los límites establecidos. Las mezclas FN 0.5% y MZ 2%-FN 0.5% presentaron los valores de módulo más altos.
- En la tensión indirecta se presentaron resultados similares a la tensión directa.
- Sobre la adherencia, además de la mezcla testigo, la mezcla FN 1.5% tuvo una resistencia mayor.

Tabla 4.26 Resumen de resultados de pruebas no destructivas

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Resistencia a la compresión simple	Resistencia mayor a los 180 días de 34.12 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia mayor a los 150 días de 33.92 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia mayor a los 150 días de 37.02 MPa - Morteros con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia similar al testigo y mayor a los 150 días de 41.63 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada
Resistencia a la flexión	Resistencia mayor a los 300 días (MR = 7.23 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo a los 300 días (MR = 6.44 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor a los 300 días (MR = 4.06 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo y a la FN 0.5% a la edad de 300 días (MR = 6.51 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)
Resistencia a la tensión directa	Resistencia mayor a los 150 días = 3.62 MPa - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	3.08 MPa (120 días) - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor de 2.70 MPa (180 días) - En el límite inferior de 0.4 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo = 3.33 MPa (180 días) - Supera los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)
Resistencia a la tensión indirecta	Resistencia similar a FN 0.5% a los 300 días (4.86 MPa) - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días (4.85 MPa) - Superando los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor de las mezclas = 3.40 MPa (150 días) a los 300 días - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días de 4.01 MPa - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)

Resistencia a la tensión por adherencia	Resistencia mayor alcanzada a la edad de 120 días = 2.96 MPa - Resistencia (180 días) = 1.83 MPa	Resistencia menor en las 2 edades de prueba - 1.52 MPa (120 días) y 0.42 MPa (180 días)	Resistencia mayor alcanzada a la edad de 180 días = 2.46 MPa - Resistencia (120 días) = 2.41 MPa	Resistencia media en comparación con las otras mezclas - 2.16 MPa (120 días) y 1.32 MPa (180 días)
---	--	---	--	--

4.4.4 Pruebas por durabilidad en el concreto endurecido

De manera general, las mezclas con sustituciones orgánicas tuvieron un buen desempeño por durabilidad. Los resultados se muestran en la Tabla 2.7 y se discuten a continuación:

- En la prueba de ataque por sulfuros, las mezclas mostraron una velocidad de corrosión baja a los 180 días. En relación a la pérdida de masa, las mezclas con sustituciones presentaron pérdidas menores que la mezcla testigo.
- Sobre la penetración rápida de cloruros, todas las mezclas con adiciones presentaron riesgos bajos, comparados con la testigo, la cual tiene un riesgo moderado.
- En las pruebas de congelamiento y deshielo, las mezclas FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% presentaron velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable, igual que la mezcla testigo.
- Como resultado de la profundidad de carbonatación, todas las mezclas presentaron resistencias medias.
- En la absorción las mezclas obtuvieron que son aptas para condiciones menos severas, aunque son de alta durabilidad y buena calidad.
- En la prueba de porosidad, la muestra FN 1.5% tuvo la menor porosidad con buena calidad y compacidad, la mezcla MZ 2%-FN 0.5% obtuvo buena calidad y compacidad, la mezcla FN 0.5% tuvo una calidad moderada, mientras que la mezcla testigo tuvo una durabilidad inadecuada.

Tabla 4.27 Resumen de resultados de pruebas por durabilidad

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Ataque por sulfatos (90 y 180 días)	(Menor estabilidad) - Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta [RE (90 días) = 16.6 kΩ-cm y RE (180 días) = 16.99 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3142.67 m/s y VPU (180 días) = 3756 m/s] - Pierde % de masa a 180 días (3.81% en el 5° ciclo)	Mortero con velocidad de corrosión baja a los 180 días [RE (90 días) = 20.69 kΩ-cm y RE (180 días) = 67.68 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3397 m/s y VPU (180 días) = 3876 m/s] - Pierde % de masa a 90 días (2.68% en el 5° ciclo)	(Mayor estabilidad) - Mortero con velocidad de corrosión baja a los 180 días [RE (90 días) = 46.44 kΩ-cm y RE (180 días) = 54.52 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3138.67 m/s y VPU (180 días) = 3788 m/s] - Pierde % de masa a 90 días (2.97% en el 5° ciclo)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta [RE (90 días) = 26.27 kΩ-cm y RE (180 días) = 22.44 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3810.33 m/s y VPU (180 días) = 3756 m/s] - Gana % de masa a 90 y 180 días (0.80% en el 5° ciclo a 180 días)

Penetración Rápida de Cloruros (180 días)	Riesgo de Penetración de cloruros moderado (2242 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1731 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1574 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1538 Coulombs)
Congelamiento y deshielo (180 días)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere un menor número de ciclos para su falla total (75 ciclos)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere 231 ciclos para su falla total	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere 172 ciclos para su falla total	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere un mayor número de ciclos para su falla total (309 ciclos)
Profundidad de Carbonatación	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.18$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 25.92 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.69$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 28.43 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 3.94$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 19.69 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.38$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 26.88 mm
Fagerlünd (1982)	Mortero apto para condiciones menos severas [s (90 días) = $1.08 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $5.81 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 7.63% y ϵ_e (180 días) = 7.47%]	Mortero apto para condiciones menos severas [s (90 días) = $2.34 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.65 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 3.79% y ϵ_e (180 días) = 4.39%]	Mortero apto para condiciones menos severas [s (90 días) = $1.92 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.27 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 1.81% y ϵ_e (180 días) = 0.97%]	Mortero apto para condiciones menos severas [s (90 días) = $2.09 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.53 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 2.29% y ϵ_e (180 días) = 0.99%]
Porosidad Total	Mortero de durabilidad inadecuada (90 días = 12.78% y 180 días = 15.88%)	Mortero de calidad moderada (90 días = 10.84% y 180 días = 10.13%)	Menor porosidad - Mortero de buena calidad y compacidad (90 días = 8.16% y 180 días = 5.22%)	Mortero de buena calidad y compacidad (90 días = 8.12% y 180 días = 6.41%)

5. Conclusiones

En la actualidad la innovación en los morteros con fines ecológicos y además poder mitigar la degradación de las estructuras de concreto son situaciones que conciernen a todas las disciplinas, por lo que se buscan soluciones alternativas a través de investigaciones, con el objetivo de reducir la huella de carbono de los procesos productivos y consumo de cemento Portland y su impacto a la atmósfera, el cual es empleado en la elaboración de concreto/mortero en obras civiles, así como incorporar productos orgánicos y endémicos del país, que permiten sustituir en porcentaje la cantidad total del cementante, obteniendo así materiales de restauración o de recubrimiento con un mejor desempeño que contrarrestan la degradación producto del ataque de agentes agresivos.

En la fabricación de las mezclas FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% se tuvo la precaución de que su elaboración fuera bajo las mismas condiciones que un mortero convencional (T10), y de esta manera se observó que si existen mejoras en sus propiedades tanto físico-mecánicas como de durabilidad. El empleo de Fibra de Nopal y de Fécula de Maíz (Almidón) en la mezcla de mortero, le infieren una densidad aceptable por lo que se puede decir que dichos materiales densifican y estabilizan a la matriz cementicia.

Para el empleo del agregado fino se realizaron procedimientos experimentales de acuerdo a la normativa vigente NMX, y por medio de su caracterización, se obtuvieron parámetros físicos muy favorables para su uso en materiales de construcción, esto debido a la baja absorción, a una muy buena densidad y a una distribución granulométrica aceptable, así como un módulo de finura dentro de los rangos establecidos por la normativa vigente.

La propiedad cementante más importante observada en las mezclas de mortero con las distintas sustituciones de material orgánico fue el tiempo de fraguado, las cuales presentaron un tiempo de fraguado final superior al testigo y a los límites establecidos por la normativa. De esta manera, los productos como la Fibra de Nopal y el Almidón trabajan como aditivos retardantes del fraguado debido a las cantidades de azúcares que contienen, beneficiando con ello el transporte y construcción de obra civil en lugares con temperaturas muy altas, ya que se presenta un bajo calor de hidratación y se tiene un mayor tiempo para la colocación de dichas mezclas. La FN 1.5% presentó un tiempo de fraguado final mayor a las demás mezclas, de 1515 minutos después de su elaboración.

Con relación a las pruebas no destructivas o parámetros físicos relacionados con la durabilidad, se obtuvo una resistividad eléctrica más alta en especímenes de FN 1.5%, clasificando los resultados como un mortero con una velocidad de corrosión

baja, obteniendo un valor de 59.9 kΩ-cm; superando considerablemente a las otras dos mezclas con sustitución (FN 0.5% con RE=35.32 kΩ-cm y MZ 2%-FN 0.5% con RE = 29.12 kΩ-cm) y al mortero testigo (T10 con RE = 21.75 kΩ-cm), teniendo estas últimas mezclas una velocidad de corrosión moderada o alta. Respecto a la prueba de velocidad de pulso ultrasónico todos los morteros tienen una clasificación de calidad durable, siendo el mortero T10 el que alcanza, a los 300 días, velocidades de pulso de hasta 4309.8 m/s; la mezcla de FN 0.5% es la de mejor comportamiento a diferencia de las otras dos mezclas con sustituciones.

Sobre las pruebas destructivas o ensayos de resistencia mecánica, en compresión simple la MZ 2%-FN 0.5% arrojó resultados satisfactorios superando al T10 con resistencia de 41.63 MPa a los 150 días, pero teniendo un comportamiento similar al mortero testigo (T10) y a las demás mezclas con fibra de nopal. Teniendo como significado usual que la matriz cementicia de los morteros logra su densificación y mantiene su resistencia conforme transcurre el tiempo. El mejor resultado de la compresión simple en los cubos de mortero con fibra de nopal se presentó a la edad de 150 días con resistencia de 37.02 MPa para la mezcla de FN 1.5%, pero teniendo a lo largo de las demás edades un comportamiento por debajo.

En cuanto a la resistencia a la tensión por flexión el mortero testigo (T10) es quien presenta un MR = 7.23 MPa, mayor que los morteros con porcentaje de sustitución de fibra de nopal y almidón a los 300 días. De las tres mezclas con sustitución orgánica se observa que la FN 0.5% logra superar a la edad de 120 y 180 días el valor de la flexión del T10, y a lo largo de las edades de prueba su comportamiento es mejor que las otras dos mezclas (FN 1.5% y MZ 2% FN 0.5%). El mortero de FN 1.5% en la prueba de flexión resultó ser la mezcla en estudio más desfavorable.

El comportamiento de la MZ 2%-FN 0.5% en el ensayo de tensión directa, es similar pero menor al mortero T10, alcanzando valores mayores a los 180 días de hasta 3.33 MPa. Ahora bien, comparando resultados de la edad de 300 días en las distintas mezclas se observa que la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% se encuentra por encima de la mezcla testigo, seguido de la mezcla FN 1.5% y FN 0.5% con valores de 2.43 y 2.24 MPa respectivamente. En la tensión indirecta las mezclas con mayor valor fueron el T10 y FN 0.5% con valores de 4.86 MPa y 4.85 MPa respectivamente.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la tensión por flexión y tensión directa e indirecta, fueron comparados con los valores de la prueba a compresión en cubos, siendo esta la única que se encuentra normada. Dichos resultados se encontraron dentro de los parámetros establecidos por la referencia para concreto e inclusive estuvieron por encima de los límites superiores, teniendo entonces, que la durabilidad y resistencia de los morteros se clasifica como alta.

En la prueba por resistencia a la adherencia las cuatro mezclas en estudio presentaron falla por resistencia a la tensión, lo que quiere decir que las distintas mezclas tuvieron una buena adherencia como material de reparación o revestimiento con el sustrato de concreto, alcanzando una resistencia de hasta 2.46

Mpa a los 180 días en la mezcla de FN 1.5%, mayor que las demás mezclas puestas en estudio.

Con respecto a los ensayos de durabilidad se logró obtener una clasificación de velocidad de corrosión baja para las mezclas con sustitución de fibra de nopal y de una alta calidad en todas las mezclas expuestas al ataque por sulfatos, teniendo entonces que las mezclas con sustituciones orgánicas en sus distintos porcentajes superaron a la mezcla testigo (T10) y en las dos edades de prueba no sobrepasaron su máximo estado de servicio. El mortero de FN 0.5% fue el que presentó mejores resultados y el T10 el más desfavorable, pero con riesgo de corrosión moderada y de una buena calidad, según la Red Durar (2020).

La mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5% presentó un riesgo bajo de penetración de cloruros (1538 Coulombs), el cual es un mejor resultado que el obtenido en las mezclas con fibra de nopal y de la mezcla T10, siendo esta última la más desfavorable presentando una clasificación de riesgo moderado con un valor de penetración de 2242 Coulombs.

De la prueba de congelamiento y deshielo no existieron resultados significativos por las pruebas de RE y VPU debido a que el número de ciclos fue muy pequeño en comparación de los 100 ciclos o más que dice la literatura respecto a ensayos de esta índole, por lo que extrapolando los valores obtenidos de la RE se llegó a la conclusión de que el mortero de MZ 2%-FN 0.5% necesita un mayor número de ciclos (309 ciclos) para llegar a su destrucción total por encima de la mezcla FN 0.5% la cual necesita 231 ciclos para ello. El mortero T10 es el más desfavorable requiriendo solo 75 ciclos para su destrucción.

Estimando la profundidad de carbonatación en los distintos morteros a una edad de 25 años, se tiene que la FN 1.5% tiene el menor valor de profundidad con 19.69 mm solo por debajo de la mezcla T10 (25.92 mm), por su constante de carbonatación es considerado como un mortero con una resistencia media a la carbonatación al igual que las otras mezclas.

En los resultados de absorción capilar se concluye que todas las mezclas tienen una baja porosidad efectiva, siendo la de menor valor la FN 1.5% (0.97%) y con una absorción capilar apta para ambientes no tan severos. Con estos valores todas las mezclas se clasifican como mezclas de buena calidad y alta compacidad. En la prueba de porosidad total la FN 1.5% presentó la menor porosidad total en su edad tardía (5.22%) seguido de la mezcla combinada de MZ 2%-FN 0.5% (6.41%), por lo que se consideran como un material de buena calidad y compacidad según las especificaciones de la Red DURAR (2020).

La sustitución de fibra de nopal y almidón densificó notablemente a la matriz cementicia, lo que dio como resultado el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas, así como las de durabilidad prevaletientes en morteros convencionales.

De manera favorable la FN 1.5% presenta mejores resultados de durabilidad, así como un mejor comportamiento en las pruebas físicas, que de igual manera el

mortero de FN 0.5% destaca por sus valores significativos en las pruebas no destructivas.

En la pruebas mecánicas o destructivas la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% es la que presenta mayores valores de resistencia, considerándose como un mortero de resistencia aceptable, pero sin dejar a un lado las sustituciones de fibra de nopal que en comparación con las de un mortero convencional no presenta diferencia en sus resistencias mecánicas.

Para estudios posteriores se propone continuar con la cantidad de sustitución de fibra de nopal en 1.5% debido a los resultados favorables de durabilidad, teniendo en consideración que se pudiera controlar de una manera más precisa la fabricación de los especímenes, y así disminuir la cantidad de variables durante la experimentación y con ello garantizar un mejor comportamiento en las pruebas mecánicas y de durabilidad.

En lo que respecta a la combinación de fibra de nopal y almidón, se recomienda proponer nuevos porcentajes de sustitución en las combinaciones y comparar los resultados con los de la actual investigación.

Finalmente, se logró demostrar que estas sustituciones orgánicas permiten obtener materiales con un comportamiento físico-mecánico y de durabilidad aceptable, que superen las características de un mortero convencional, y con ello disminuir el consumo y empleo de cemento Portland, así como reducir las emisiones a la atmósfera debido la producción de este cemento.

Dado que se tuvieron buenos resultados en las distintas mezclas elaboradas, se concluye que los materiales pueden emplearse en la aplicación de recubrimientos o de restauración en obras civiles de elementos de concreto, siendo estos los usos habituales de un mortero hidráulico.

Bibliografía

- Alonso, E., Martínez-Gómez, L., Martínez, W. y Castano, V. (2002). Preparation and characterisation of ancientlike masonry mortars. *Advanced Composites Letters*, 11, 33–6. <https://doi.org/10.1177/096369350201100>
- Álvarez, J., Martín Pérez, A. y García Casado, P. (1995). *Historia de los morteros*. [Boletín Informativo No. 52]. Universidad de Navarra.
- Aguirre, A., Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, 63(309), 7-38. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>
- American Concrete Institute. (2010). *Report on Chemical Admixtures for Concrete. ACI 212.3R-10*. ISBN 978-0-87031-402-5. Farmington Hills, MI, USA.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (1985). *ASTM C190-85: Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars* (Withdrawn 1990).
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (1997). *ASTM C666-97: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2004). *ASTM C187-04: Standard Test Method For Normal Consistency Of Hydraulic Cement*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2013). *ASTM C266-13: Standard Test Method For Time Of Setting Of Hydraulic-Cement Paste By Gillmore Needles*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2015). *ASTM C151/C151M-15: Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2017). *ASTM C142/C142M-17: Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2017). *ASTM C494/C494M-17: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2019). *ASTM C1202-19: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2019). *ASTM C1857/C1857M-19: Standard Test Method for Evaluating the Adhesion (Pull-Off) Strength of Concrete Repair and Overlay Mortar*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2019). *ASTM F2170-19a: Standard Test Method for Determining Relative Humidity in Concrete Floor Slabs Using in situ Probes*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *ASTM C109/C109M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *ASTM C1583/C1583M-20: Standard Test Method For Tensile Strength Of Concrete Surfaces And The Bond Strength Or Tensile Strength Of Concrete Repair And Overlay Materials By Direct Tension (Pull-Off Method)*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *ASTM G57-20: Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2021). *ASTM C348-21: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2022). *ASTM C150/C150M-22: Standard Specification for Portland Cement*.
- Arguello Hernández, S. (2012). *Análisis comparativo entre Técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus*. [Tesis]. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil. UMSNH.
- British Standards Institution. (1991). *BS 4027:1980 Specification for sulphate-resisting Portland cement*.
- British Standards Institution. (1996). *Specification of Ordinary Portland Cement*.
- Calafell Carrera, Daileny. (2018). *Propuesta de tecnologías para la acetilación de almidón de yucca*. [Tesis]. Villa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Calvo, Miguel. (2022). *Bioquímica de los alimentos: Estructura del almidón*. España: Universidad de Zaragoza. <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>
- Carbonara, G. (2007). *Trattato di restauro architettonico. Vols I and II*. Roma: UTET.

- Cárdenas, A., Arguelles, W. & Goycoolea, F. (1998). On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 3, 64–71.
- Chandra, S., Eklund L. & Villarreal, R. (1998). Use of Cactus in Mortars and Concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(1), 41-51. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00254-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00254-8)
- Colín Velázquez, L. (2016). *Matrices cementicias densificadas con adiciones orgánicas para pavimentos semi-rígidos en Tlalpujahua*. [Tesis]. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Colombini, M., Ceccarini, A., Carmignani, A. (2002). Ion chromatography characterization of polysaccharides in ancient wall paintings. *Journal of Chromatography A*. 968(1–2), 79-88. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00950-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00950-0)
- Del Valle, A., Guzmán, J., Alonso, E., Martínez Molina, W., Torres A., Terán, J., Montes, M., Torres, A. y Martínez Madrid, M. (2015). *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adicionados con fibras deshidratadas de cactus opuntia*. [Publicación Técnica No. 448]. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Fagerlund, G. (1982). *The capillarity of concrete*. Nordic Concrete Research, Issue Number 1. Nordic Concrete Federation.
- Hennig, E. & Bleck, R. (1968). Mörteluntersuchungen an mittelalterlichen Bauwerken. *Thüringen, Ausgrabungen und Funde. Band 13 (5)*: 24-27
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colección Básica del Concreto, Tecnología y Propiedades. 2da. Ed. Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Izaguirre, A., Lanás, J. y Álvarez, J. (2010). Efecto de un polímero natural biodegradable en las propiedades de morteros de cal en estado endurecido. *Materiales de Construcción*, 61 (302), 257-274. DOI: 10.3989/mc.2010.56009
- Jacobo, S. (2014). *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. [Tesis]. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. (1ª Ed.). Portland Cement Association. ISBN 0-89312-233-5
- Kurugöl, S., Güleç, A. (2012). Physico-Chemical, Petrographic, and Mechanical Characteristics of Lime Mortars in Historic Yoros Castle (Turkey). *International*

Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis, and Restoration, 6, (3). <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.540072>

López Regalado, F. (2016). *Densificación de matrices cementicias a base de adiciones orgánicas*. [Tesis]. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Luxán, M., Dorrego, F. & Laborde, A. (1995). Ancient gypsum mortars from St. Engracia (Zaragoza, Spain): Characterization. Identification of additives and treatments. *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1755-1765. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00171-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00171-9)

Moreno, G. (2012). *Diseño por durabilidad de mezclas de concreto hidráulico variando los agregados pétreos. Evaluación de resultados mediante pruebas destructivas y no destructivas*. [Tesis]. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Navarro, L., Martínez Molina, W. y Espinoza, J. (2011). *Manual de Laboratorio de Análisis de Materiales*. (3ª Ed.). Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Neville, A. (2013). *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. ISBN 968-464-092-7

Neville, A. y Brooks, J. (1999). *Tecnología del concreto*. México: Trillas. ISBN 10: 9682404614 / ISBN 13: 9789682404610

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-030-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agregados – Muestreo*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-071-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de Terrones de Arcilla y Partículas deleznales*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agua para Concreto – Especificaciones*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-205-ONNCCE-2005. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia del Concreto a la Congelación y deshielo Acelerados*.

-
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-075-ONNCCE-2006. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Sanidad Por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-148-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-263-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Endurecido - Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-303-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Flexión Usando una Viga Simple con Carga en el Centro del Claro.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-111-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-165-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-480-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Geotecnia - Equivalente de Arena de Agregados Finos - Método de Ensayo.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-486-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Mampostería - Mortero para uso Estructural - Especificaciones y Métodos de Ensayo.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-057-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Consistencia Normal.*
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria de la*
-

Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-062-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Sanidad de Cementantes Hidráulicos.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-144-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos -Requisitos Para El Aparato Usado En la Determinación de la Fluidez de Morteros.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-529-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción – Mampostería – Mortero para Uso No Estructural – Especificaciones y Métodos de Ensayo.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-084-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Partículas Más Finas Que la Criba 0,075 Mm (No. 200) por Medio de lavado - Método de Prueba.*

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. *NMX-C-166-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba.*

Pecchioni, E., Fratini, F. & Cantisani, E. (2008). *Le malte antiche e moderne tra tradizione e innovazione.* Bologna, Italia: Patron Editore.

Rampazzi, L., Colombini, M., Conti, C., Corti, C., Lluveras-Tenorio, A., Sansonetti, A., and Zanaboni, M. (2015) Technology of Medieval Mortars: An Investigation into the Use of Organic Additives. *Archaeometry*, 58, 115 – 130. <https://doi.org/10.1111/arcm.12155>

Red DURAR. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.* (3ª Ed.). CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo

- Rivera L. y Gerardo A. (2013). *Concreto Simple / Capítulo 7 Durabilidad del concreto*. Colombia: Universidad del Cauca.
- Rosell, J. y Cantalapiedra, I. (2010). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48. DOI: 10.3989/mc.2010.53509
- Sánchez de Guzmán, D. (1996). *Tecnología del concreto y del mortero*. (3ª Ed.). [Biblioteca de la construcción]. Bogotá: Bhandar Editores.
- Sanjuán, M., Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*. España: Universidad de Alicante, Departamento de Construcciones Arquitectónicas.
- Sickels, L. (1981). *Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars. Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings*. Symposium ICCROM.
- Tello, J. (2019). *Estudio de la eficiencia del aditivo SIKA® CEM plastificante en el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia utilizando concreto reciclado en Chiclayo – 2017*. [Tesis]. Perú: Universidad Señor de Sipán.
- Torres Acosta, A., Celis, C., Martínez Molina, W., Lomelí, M. (2010). *Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cetáceas*. [Publicación Técnica No. 326]. México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres Acosta, A., Martínez Molina, W., Lomelí, M., Pérez Gallardo, A. (2010). *Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto*. [Publicación Técnica No. 328]. México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres Acosta, A., Martínez Molina, W., Alonso, E. (2012). State of the Art on Cactus Additions in Alkaline Media as Corrosion Inhibitors. *International Journal of Corrosion*, 2012, Article ID 646142, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2012/646142>
- Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P. & Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 25 (8), 3313-3318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>
- Zeng, Y., Zhang, B. & Liang, X. (2008). A case study and mechanism investigation of typical mortars used on ancient architecture in China. *Thermochimica Acta*, 473 (1–2), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.03.019>

Ligas consultadas:

<http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/60-de-la-historia-del-cemento>

(consultada el 29-Sep-22)

<https://www.oficemen.com/el-cemento/historia-del-cemento/> (consultada el 29-Sep-22)

https://www.cemexmexico.com/quizzes-full-view/-/asset_publisher/uG2W76KBBu5B/content/los-aditivos-y-su-clasificaci-1
(consultada el 30-Sep-22) [CEMEX, 2022]

<https://cetesa.com.co/blog/cuales-son-las-propiedades-del-cemento-2/> (consultada el 4-Oct-22) [CETESA, 2022]

<http://www.tigercement.com/cement-products/sulphate-resistant-cement/british-standard-bs-4027-1980/> (consultada el 4-Oct-22)

<http://www.tigercement.com/cement-products/ordinary-portland-cement/british-standard-bs-12-1996/> (consultada el 4-Oct-22)

<https://www.forconstructionpros.com/concrete/equipment-products/article/11359846/kb-engineering-llc-water-in-concrete> (consultada el 5-Oct-22)

<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/nopales> (consultada el 6-Oct-22) [Biodiversidad, 2022]

<https://www.quiminet.com/articulos/el-almidon-de-maiz-y-sus-usos-mas-comunes-2552671.htm> (consultada el 7-Oct-22)

<https://quimicoglobal.mx/tag/proteinas-basicas/> (consultada el 7-Oct-22)

<https://molwick.com/es/materia/135-gravedad.html> (consultada el 12-Oct-22)

<https://civilgeeks.com/2013/08/28/libro-de-tecnologia-del-concreto-y-mortero-ing-gerardo-a-rivera-l/> (consultada el 13-Oct-22)



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, 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/>