



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto mediante puzolanas naturales para su aplicación en pavimentos rígidos.

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías terrestres y Movilidad

**Presenta:**

Luis Gerardo Cruz Flores

**Dirigido por:**

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. Teresa López Lara

Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. Marina Vega González

Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Francisco Javier García Rodríguez

Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

Centro Universitario. Querétaro, Qro.

Octubre del 2019

México

## RESUMEN

La fabricación de cemento contribuye al calentamiento global porque es responsable del 5% -7% de las emisiones de dióxido de carbono, el cual es un factor clave en el calentamiento global. Debido a esto, en esta investigación se buscó sustituir zeolita por cemento en la mezcla de concreto para que se reduzca el impacto ambiental y que el concreto mejore o mantenga sus propiedades. El rango que se estableció para la sustitución fue del 7-12% ya que este rango fue en el que distintos investigadores presentaron sus mejores resultados. La zeolita utilizada como sustituto del cemento es de la región de Puebla con un tamaño promedio de partículas menor a 74 micras. El enfoque de esta investigación es la utilización del concreto con zeolita como la losa de concreto de un pavimento.

Este trabajo se encuentra comprendido por 4 etapas:

La etapa 1 consta en la caracterización de los agregados (grueso y fino) y la evaluación de estos con base a la normativa mexicana N·CMT para saber si son adecuados para utilizarse en una mezcla de concreto.

La etapa 2 consta de la caracterización de la zeolita: difracción de rayos X para conocer sus principales componentes mineralógicos, Microscopía electrónica de barrido para conocer la morfología, formas de las partículas, tamaños y textura. Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), con esta técnica se logran identificar los principales elementos que componen la zeolita y se obtienen resultados del porcentaje de cada uno de estos en promedio. Y, por último, se realizó una prueba de granulometría para conocer los tamaños de la zeolita dado que el tamaño promedio de las partículas de la zeolita está relacionado directamente con lo reactiva que es la zeolita y la velocidad de la reacción.

La etapa 3 consta en diseñar las distintas mezclas (control y mezclas con porcentajes de sustitución de cemento de zeolita) en esta etapa se realizó el diseño de la mezcla de control según el método de la ACI 211 y los porcentajes de sustitución se realizaron 7-11% que se estableció analizando el estado del arte.

La etapa 4 consistió en evaluar las propiedades de las mezclas diseñadas en la etapa 3 para evaluar sus propiedades (revenimiento, compresión y flexión) para poder establecer cuál era el porcentaje óptimo de sustitución con sustento.

La zeolita natural de la región de Puebla al ser utilizada como un sustituto del cemento presentó resultados favorables obteniéndose mejoras en la resistencia a la compresión y flexión después de los 28 días de edad, presentando un incremento en la resistencia a la flexión de 4.7% a los 28 días de edad en la mezcla Z-9. Esto último resultó muy significativo pues la flexión es el valor más importante al utilizar el concreto en pavimentos (enfoque propio de esta investigación). Otro punto importante es que sustituir cemento por zeolita en el rango de 7-11 por ciento hace el concreto más económico en el rango de 1.9-3% y se llegó a la conclusión que el porcentaje óptimo de sustitución es de 9%.

**Palabras clave:** Concreto, zeolita, resistencia a la compresión, módulo de ruptura, cemento, reacción puzolánica.

## SUMMARY

The manufacture of cement contributes to global warming because it is responsible of 5% to 7% of carbon dioxide emissions which is a key factor in global warming, due to this fact this research focus is to replace cement with zeolite in the mixture of concrete to reduce the environmental impact and to improve the concretes mechanical properties, the range that was established for the substitution was 7% to 12% because in this range different researchers reported their best results, the Zeolite used as a substitute of cement is from the region of Puebla with an average particle size smaller than 74 microns, the focus of this research is the use of concrete with zeolite as the concrete slab of a pavement.

This work is composed of 4 stages:

Stage 1 consists on the characterization of the aggregates (coarse and fine) and their evaluation based on the Mexican normative N · CMT to know aggregates are suitable to be used in a concrete mixture.

Stage 2 consists of the characteristic of zeolite: x-ray diffraction to know its main mineral components, scanning electron microscopy to know the morphology, particle shapes, sizes and texture of the particles, X-ray energy dispersion spectrometry (EDS) with this technique the point was to identify and understand the main elements that compose the zeolite. granulometry test was carried on due to the size of the zeolite is directly related to the reactivity of the zeolite and the speed of the reaction so it is important to know the average particle size.

Stage 3 consists in design of different mixtures (control and mixtures with percentages of substitution of cement by zeolite) in this stage the design of the control mixture is developed according to the method of the ACI 211 and the substitution percentages are performed at the range of 7- 11% this range was determined by the latest investigations of concrete with zeolite.

Stage 4 consisted of evaluating the properties of the mixtures designed in stage 3 to evaluate the properties (slump, compression and bending) in order to establish the optimum percentage of substitution.

The natural zeolite of the Puebla region that was used as a substitute for cement showed favorable results, obtaining improvements in the resistance of compression and bending after 28 days, obtaining an increase in the resistance to flexion of 4.7% at 28 days in the Z-9 mixture, which was very significant because flexion is the most important value when using concrete in pavements, which was the focus of this investigation, another important point is that the replacing cement with zeolite in the range of 7%-11 % reduces the cost of concrete more in the range of 1.9-3% and it was concluded that the optimal substitution percentage is 9%.

**Keywords:** Concrete, zeolite, compressive strength, modulus of rupture, cement, pozzolanic reaction.

## DEDICATORIA

A mis papás, Rosa María Flores Martínez e Isidro Roberto Cruz Medina, por apoyarme de forma incondicional en todas mis elecciones. Gracias por haberme enseñado a ser firme en mis decisiones y principios porque gracias a estas enseñanzas he logrado desarrollarme exitosamente como profesionalista y cumplir mis objetivos.

A mis hermanos, Paola y Roberto, porque más allá de ser mis hermanos han sido mis amigos y unos grandes maestros al aconsejarme y apoyarme en cada etapa de mi vida.

A mi novia, María Fernanda Munguía Quintero, por todo el tiempo presente en mi vida ya que de no haber vivido lo que contigo no tendría la experiencia y perspectiva que ahora tengo, gracias por tu ayuda constante y sobre todo por tu apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, Isidro Roberto Cruz Medina y Rosa María Flores Martínez, por brindarme su apoyo incondicionalmente y por siempre ser un gran ejemplo.

A mi novia, María Fernanda Munguía Quintero, por todo el tiempo presente en mi vida. Gracias por tu ayuda constante y sobre todo por tu apoyo.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, asesor de este trabajo de investigación. Gracias por su ayuda en todo momento, por el aprendizaje compartido, por su apoyo y, especialmente, por su amistad.

A quiero agradecer también al personal del laboratorio que siempre se mantuvo atento y proporcionándonos el equipo para realizar las pruebas, así como también por ayudarnos a realizar los ensayos de cilindros y vigas.

A Dagoberto Paz Martínez, dueño de Grupo TCDN. S.A. DE C.V., por proporcionarme la zeolita para realizar esta investigación, por brindarme buena atención y por su interés en el seguimiento de la investigación.

A mi comité de tesis por todas las observaciones, recomendaciones, revisiones y correcciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme esta maravillosa oportunidad de estudiar un posgrado de calidad, por brindarme el apoyo económico necesario para poder cumplir la meta de estudiar un posgrado.

A mi compañero de maestría Rafael Murrieta por su amistad, apoyo y ayuda en esta investigación.

## ÍNDICE

<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
RESUMEN .....	ii
SUMMARY .....	ii
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO I . - INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	16
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.3 HIPÓTESIS.....	17
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	17
CAPÍTULO II . - FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	18
2.1 Puzolanas .....	18
2.1.1 Zeolita .....	19
2.2 Pavimentos.....	24
2.2.1 Capas de los pavimentos .....	25
2.2.2 Pavimentos flexibles .....	26
2.2.3 Pavimentos rígidos.....	26
2.2.4 Método de diseño PCA para pavimentos rígidos. Método de la Portland Cement Association (PCA) .....	27
2.3 Concreto.....	27
2.3.1 Definición .....	27
2.3.2 Componentes del concreto .....	28
2.4 Concretos con zeolita:.....	33
CAPÍTULO III . – METODOLOGÍA .....	44
Diagrama de metodología.....	44
3.1.- Paso 1: Selección y caracterización del agregado pétreo. ....	44
3.1.1.- Muestreo (NMX-C170-ONNCCE-1997) .....	45
3.1.2.- Granulometría del agregado grueso y fino (ASTM C 136 – 01).....	46
3.1.3. - Límite Líquido (BS 1377: Part 2:1990).....	48
3.1.4. - Límite plástico (M.MMP-1-07/07).....	50
3.1.5. - Contracción lineal.....	51
3.1.6. - Equivalente de arena (ASTM D 2419 – 02).....	52

3.1.7. - Densidad relativa y absorción de agua del agregado fino (NMX-C-165-ONNCCE-2014)	53
3.1.8. - Densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso (NMX-C-165-ONNCCE-2014)	56
3.1.9. - Desgaste por abrasión (prueba de Los Ángeles) (NMX-C-196-ONNCCE-2010)	57
3.1.10. - Módulo de finura (ASTM C 125)	59
3.1.11. - Peso volumétrico suelto de la arena y grava	60
3.1.11. - Peso volumétrico compacto de la arena y grava (ASTM C 29)	62
3.2.- Pasó 2: Caracterización zeolita	63
3.2.1. - Difracción de Rayos X (DRX)	63
3.2.2. - Fluorescencia de Rayos X (FRX)	65
3.2.3.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	65
3.3.- Paso 3: Diseño de mezclas	66
3.4.- Paso 4: Pruebas al concreto	70
3.4.1.- Ensayo de compresión simple (NMX-C-083-ONNCCE-2014)	70
3.4.2.- Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón (NMX-C-191-ONNCCE-2015)	72
3.4.3.- Prueba revenimiento al concreto fresco (NMX-C-156-ONNCCE-2010)	74
CAPÍTULO IV . - RESULTADOS	75
4.1 Caracterización del agregado fino y grueso	75
Desgaste los ángeles	79
4.2 Caracterización de la zeolita y cemento	80
4.2.1 Difracción de rayos X:	80
4.2.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)	82
4.2.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM):	82
4.2.3 Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS):	85
4.2.4 Granulometría de zeolita	86
4.3 Diseño de mezclas	88
4.4 Pruebas al concreto	89
4.4.1 Revenimiento	89
4.4.2 Resistencia a la compresión	90
4.4.3 Resistencia a la flexión	93
4.4.4 Comparativa económica de mezclas	96
CAPÍTULO V . -CONCLUSIONES	97
CAPÍTULO VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Pág.</b>
I.1.- Mejores resultados de diferentes autores. ....	16
II.1.- Comparación de propiedades de diferentes zeolitas. ....	20
II.2.- Diferentes propiedades físicas y químicas de zeolitas. ....	22
II.3.- Clasificación estructural de las zeolitas. ....	24
II.4.- Tipos de cementos y sus características. ....	30
II.5.- Composición química del cemento Portland y zeolita natural. ....	34
II.6.- Características de las mezclas utilizadas. ....	35
II.7.- Composición química del cemento Portland y zeolita natural. ....	35
II.8.- Propiedades físicas de los agregados. ....	36
II.9.- Composición del concreto 1m <sup>3</sup> . ....	36
II.10.- Composición del cemento y zeolita. ....	37
II.11.- Proporciones de la mezcla. ....	37
II.12.- Proporciones de la mezcla. ....	38
II.13.- Características de agregados. ....	41
II.14.- Resultados de resistencia a la compresión. ....	41
II.15.- Composición química de zeolita. ....	42
II.16.- Resistencia a la compresión y flexión de los especímenes. ....	43
III.1.- Revenimiento recomendado dependiendo del tipo de construcción. ....	67
III.2.- Cantidad de agua necesaria por m <sup>3</sup> para concretos sin aire incluido. ....	68
III.3.- Relación agua-cemento con base a esfuerzo a la compresión y el tipo de concreto. ....	68
III.4.- Volumen de agregado grueso. ....	69
IV.1.- Granulometría de agregado fino. ....	75
IV.2.- Absorción y densidad de los agregados. ....	76
IV.3.- Límites de consistencia. ....	77
IV.4.- Equivalente de arena obtenido. ....	77
IV.5.- Pesos volumétricos. ....	78
IV.6.- Granulometría agregado grueso. ....	78
IV.7.- Pesos volumétricos. ....	79
IV.8.- Desgaste los ángeles. ....	80

IV.9.- Composición química de la zeolita. ....	82
IV.10.- Composición elemental (EDS) de zeolita y cemento Portland. ....	85
IV.11.- Granulometría de la zeolita. ....	86
IV.12.- Resumen de características de agregados. ....	87
IV.13.- Resumen de características de zeolita. ....	88
IV.14.- Dosificación de la mezcla. ....	88
IV.15.- Diferentes mezclas. ....	89
IV.16.- Revenimiento. ....	90
IV.17.- Comparativa de valores de resistencia. ....	93
IV.18.- Comparativa de valores de resistencia. ....	95
IV.19.- Comparativa económica de mezclas. ....	96

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
I-1.- Clasificación de las Puzolanas .....	12
II-1.- Unidad de construcción primaria de estructura de zeolita. ....	20
II-2.- Capas que forman en general un pavimento flexible.....	26
II-3.- Capas que forman un pavimento rígido.....	27
II-4 Observación visual de especímenes de mortero después de 32 semanas de exposición.....	39
III-1. – Desarrollo de la investigación. ....	44
III-2. - Cuarteo del material. ....	46
III-3.- Tamizado de la grava. ....	47
III-4.-Tamizado de la arena.....	48
III-5.- Prueba limite líquido como inglés.....	50
III-6 Contracción lineal.....	51
III-7. - Prueba equivalente de arenas. ....	53
III-8.- Muestra después de retirar el molde.....	54
III-9.- Compactación en molde. ....	55
III-10.- Prueba densidad del agregado fino.....	55
III-11.- Prueba densidad del agregado fino.....	57
III-12.- Equipo de abrasión. ....	58
III-13.- Prueba desgaste los ángeles.....	58
III-14.- Lavado de material retenido en malla 12. ....	59
III-15.- Prueba peso volumétrico seco suelto.....	61
III-16.- Colocación de cemento en porta muestras. ....	64
III-17.- Muestras en el difractor. ....	64
III-18.- Muestra colocada en cinta adhesiva. ....	65
III-19.- Muestras de cemento y zeolita en molde correspondiente de microscopio.....	66
III-20.- Cabeceo de cilindro. ....	71
III-21.- Aplicación de carga a cilindro de concreto. ....	71
III-22.- Cilindro de concreto ensayado. ....	72
III-23.- Ensayo a flexión de vigas.....	73
III-24.- Ensayo a flexión de vigas.....	74

IV-1.- Granulometría del agregado fino .....	76
IV-2.- Limite liquido obtenido por el método de cono inglés.....	77
IV-3.- Granulometría del agregado grueso. ....	79
IV-4.- Espectro de DRX del cemento. ....	81
IV-5.- Espectro de DRX de la zeolita. ....	81
IV-6.-Micrografías por SEM de la zeolita natural. ....	84
IV-7.-Micrografías por SEM del cemento Portland.....	84
IV-8.- Curva granulométrica de zeolita. ....	87
IV-9.- Revenimiento 0. ....	90
IV-10.-Resistencias promedio a la compresión de distintas mezclas. ....	91
IV-11.-Cruvas resistencia vs tiempo. ....	92
IV-12.-Resistencias promedio a la flexión de distintas mezclas.....	94
IV-13.-Curvas resistencia vs tiempo. ....	95

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## CAPÍTULO I . - INTRODUCCIÓN

Las puzolanas son sustancias naturales o industriales que se encuentran compuestas principalmente por sílice o materiales silicoaluminosos. Por sí solas no tienen un valor cementante, pero molidas finamente, en presencia de agua a temperatura ambiente reaccionan con el hidróxido de calcio generado en la hidratación de cemento Portland para formar compuestos hidraulizantes (Falconce *et al.*, 2002). En este sentido, Soria (1983) expone que el término puzolana se utiliza hoy en día para definir los materiales que tiene las siguientes características: aptitud para reaccionar con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en presencia de agua y aptitud para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes, además menciona que estas se clasifican con base a su origen, ya sean naturales o artificiales, y se describe en la figura I.1.

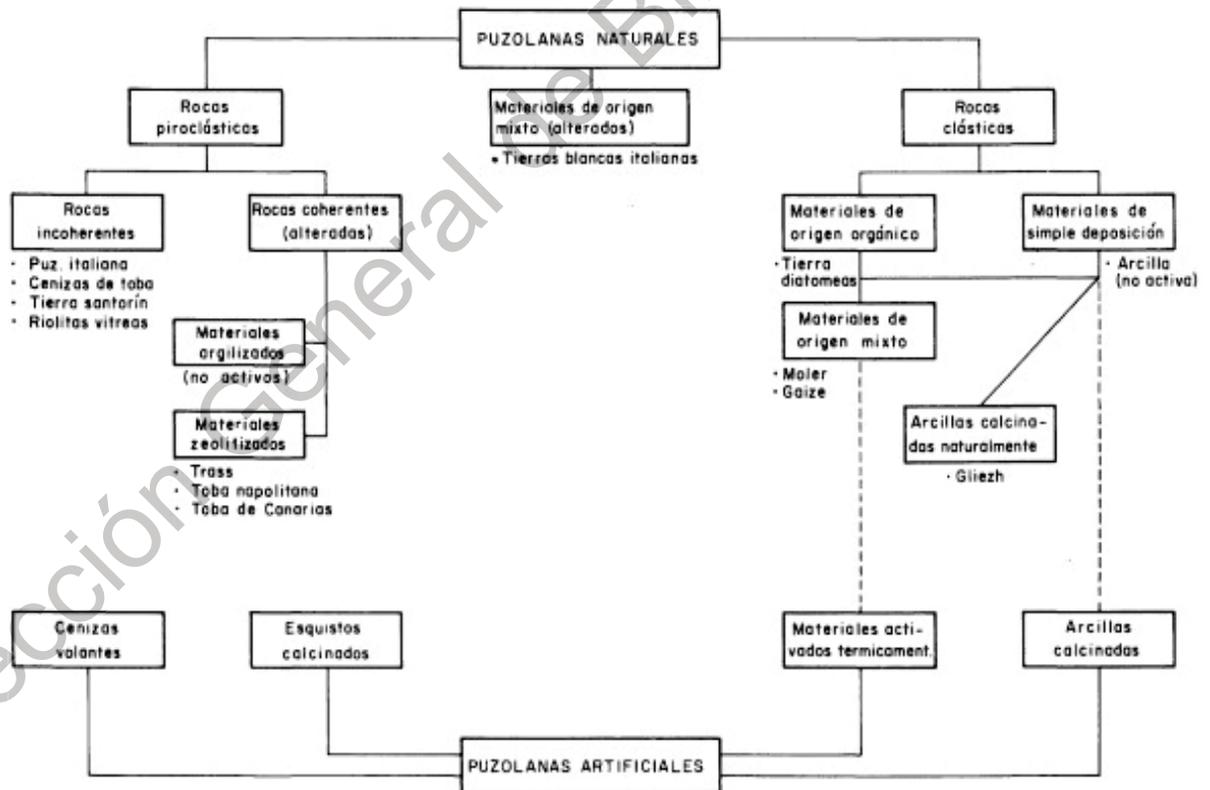


Figura I-1.- Clasificación de las Puzolanas

Fuente: Soria (1983).

Una puzolana de origen natural o artificial es la zeolita, Las zeolitas naturales se encuentran entre los minerales autógenos más comunes: las rocas sedimentarias; no obstante, debe decirse que se forman en un amplio rango de rocas de diferente origen, edad y ambiente geológico de deposición, siendo su presencia en estos medios, precisamente, lo que ha constituido un criterio directo y moderno para su clasificación (Pérez, D. *et al.* 1997).

Bosch y Schifter (2003) definen a la zeolita como aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos. Lobo (2003) concuerda con ellos respecto a que al deshidratarse se desarrolla un cristal ideal con una estructura porosa con diámetros de poro mínimos; o sea, de 3 a 10 angstroms. La estructura de los aluminosilicatos forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimientos que le permiten el intercambio iónico y la deshidratación reversible. Por otro lado, los Nagrockiene y Girskas (2016) mencionan que las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos con estructuras de marco abierto 3D, construidas de tetraedros (Al, Si) O<sub>4</sub>, y están clasificadas de acuerdo con la relación SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Las propiedades benéficas de las zeolitas son su estructura regular, su gran área específica interna (aproximadamente 600-800 m<sup>2</sup>/ g), sus poros de tamaño uniforme y su buena estabilidad térmica. Rosell (2007) concuerda con Fuentes y Martínez (2007) respecto a que las zeolitas pueden utilizarse como un árido en los materiales de construcción.

Costafreada *et al.* (2011) menciona que el carácter reactivo de las zeolitas naturales en las mezclas de concreto depende principalmente en su grado de finura y menciona que para tener una reacción aceptable es necesario que el tamaño de las partículas sea menor a 63 μ, también es un hecho que este tamaño de partículas influye en la velocidad de reacción.

La norma ASTM C 494 (2013) menciona que un aditivo es una sustancia química adicional a los agregados (agua y cemento) que tiene el fin de modificar sus propiedades y cualidades. El IMCYC (2006) expone que cada aditivo tiene una diferente función y menciona las razones más comunes para las cuales se utilizan que son: i) Incrementar la trabajabilidad, ii) Reducir el contenido de agua, iii) Ajustar el tiempo de fraguado, iv) Mejorar la durabilidad potencial, v) Reducir la permeabilidad y vi) Compensar propiedades del agregado.

En la actualidad, Markvic *et al.* (2016), Nagrockiene y Girsk (2016), Dopico *et al.* (2009), y Najimi *et al.* (2012) han utilizado la zeolita con aditivo o material del concreto con diferentes fines; unos para reducir la cantidad de cemento Portland a utilizar y otros para aumentar su resistencia, mejorar su durabilidad, entre otras aplicaciones. A continuación, se mencionarán algunos avances que se tienen hoy en día.

Markvic *et al.* (2016) realizó pruebas en las que redujo un poco la cantidad de cemento Portland y lo substituyo por zeolita natural variando las proporciones. Después de realizar las pruebas pertinentes llegó a la conclusión de que al substituir un porcentaje de concreto por zeolita reduce la resistencia a la compresión durante los primeros 90 días, pero después de los 180 días la resistencia a la compresión en los concretos con zeolita es mayor obteniendo resultados de resistencia a la compresión máxima de 62 Mpa y un mínimo de 57Mpa.

Por otra parte, Nagrockiene y Girskas (2016) realizaron pruebas a diferentes proporciones de cemento, variando desde 0% hasta 10 % del contenido de zeolita utilizando en toda la misma cantidad de aditivo plastificante, en las cuales se llegó a la conclusión que los concretos con 10% de zeolita aumentan la resistencia de un 13.3% a un 15% después de los 28 días de curado el resultado máximo y mínimo de resistencia a la compresión fue 79.4 Mpa y 70.1 Mpa. La modificación de concreto con aditivos naturales de zeolita mejora la durabilidad del concreto. Los concretos con zeolita tienen menor absorción de agua y mayor porosidad cerrada. Dopico *et al* (2009) también trabajó con concretos con zeolita, pero además les agregó cal para disminuir la cantidad de cemento Portland a utilizar en las mezclas y obtuvo resultados de resistencia a la compresión máximo de 45 Mpa y mínimo de 26 Mpa. En estas mezclas utilizó diferentes porcentajes de aditivos químicos, relación cemento-agua, cantidad de zeolita, cantidad de agregados. Al realizar estos experimentos llegó a la conclusión que se puede sustituir hasta en un 37% el cemento Portland por zeolita, cal y aditivo Mapefluid N200 y se logra cumplir con los requerimientos de resistencia a la compresión, trabajabilidad exigida además de durabilidad.

Najimi *et al.* (2012) también realizó pruebas a concretos con 0%, 15% y 30%, utilizando diferentes porcentajes de aditivo superplastificante. Con estas pruebas obtuvo como resistencia máxima a la compresión de 45.6 Mpa y 42.3 Mpa como mínimo. Además, se hicieron algunos descubrimientos y se llegó a estas conclusiones: al adicionar zeolita al concreto se pierde trabajabilidad y disminuye el tiempo en el que el concreto empieza a endurecerse; los concretos con zeolita mostraron menores resistencias a la compresión en todas las etapas en comparación al espécimen de control; se descubrió un rendimiento no satisfactorio en concretos con zeolita en un ambiente ácido; en contraste, los aspectos que mejoraron fueron la penetración de iones de cloruro, la velocidad de corrosión, la contracción por secado y la penetración de agua.

Pérez *et al.* (2012) realizó especímenes de concreto con zeolita y sin zeolita con el objetivo de lograr una resistencia fijada en 30 Mpa, calculó los costos en ambos casos para llegar a la resistencia de 30 Mpa y llegó a la conclusión de que el concreto con zeolita con la misma resistencia es un 6.19% más barato aproximadamente.

En la tabla I.1 se muestran los porcentajes de sustitución donde cada uno de los distintos investigadores obtuvieron su mejor resultado. Además, también se marca si utilizaron aditivos y la relación agua-cemento que utilizaron.

Como se puede observar en la tabla I.I sustituyendo cemento por zeolita en el rango de 5-10% se obtienen los mejores resultados sin embargo las mejoras que reportan los investigadores son diferentes esto se debe a que las zeolitas utilizadas son diferentes en cuanto a composición y tamaño.

Tabla I.1.- Mejores resultados de diferentes autores.

Nombre	Zeolita (%)	a/c	Aditivo	% de mejora con respecto al espécimen de control		
				7 días	28 días	90 días
Markvic <i>et al.</i> (2016)	10	0.5	P. y E.A.		-6.71%	-4.77%
Nagrockiene y Girskas (2016)	10	0.45	P.	15.01%	13.27%	
Najami <i>et al.</i> (2012)	15	0.5	P.	-9.94%	-3.68%	-2.70%
Eskandari <i>et al.</i> (2015)	5	0.45	P.	-19.45%	0.98%	14.86%
Akbar <i>et al.</i> (2013)	10	0.45	-	-2.79%	13.70%	13.75%
Miranda <i>et al.</i> (2014)	5	0.85	-	-15.07%	3.74%	
Vejmelková <i>et al.</i> (2014)	7.5	0.38	E.A.	-17.88%	-14.90%	3.45%

\*P= Plastificante. \*E.A.= Includor de aire.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Aunque se han realizado varios estudios de investigación recientes sobre los efectos de la zeolita natural en las propiedades del concreto, la mayoría se centra en reducir la cantidad de cemento Portland que se utilizará, independientemente de si la resistencia disminuye. Además de que existen algunas variaciones en las conclusiones de los autores como se muestra a continuación, Miranda *et al.* (2002) y Najami *et al.* (2012) mencionan que los hormigones con zeolita muestran menos resistencia en todas las etapas. Otras opiniones de Vejmelková *et al.* (2014). (2016) y Markvic *et al.* (2016) concluyen que los hormigones con zeolita tienen resistencias más bajas en los primeros 90 días, pero luego de 180 días tienen mayores resistencias al usar zeolita. Una declaración opuesta es la de Nagrockiene y Girskas (2016) que mencionan que los hormigones con un 10% de zeolita aumentan su resistencia del 13,3% al 15% en todas las etapas. Desde lo expuesto anteriormente, el propósito de esta tesis es establecer un rango en el que el cemento pueda reemplazarse por zeolita sin perder resistencia y encontrar cuál es el porcentaje óptimo para usar dentro de este rango utilizando una zeolita natural de México.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El uso de cemento Portland para hacer concreto es el responsable de las emisiones del 5% al 8% de dióxido de carbono, este cual es un factor clave en el calentamiento global. Durante el proceso de fabricación del cemento, el CO<sub>2</sub> emitido es de aproximadamente 850 kg por tonelada de cemento; además, el contacto con el cemento tiene repercusiones en términos de salud. Al utilizar zeolita como un material cementante suplementario se reduce la cantidad de cemento Portland, lo que reduce el impacto ambiental. Por otra parte, se busca una forma de aumentar la resistencia sin tener que aumentar la cantidad de cemento.

## **1.2 HIPÓTESIS**

La utilización de zeolita de la región de México aumentará la resistencia a la compresión simple en concretos un 20% o más debido a la adición de zeolita ocasiona que se aumente la duración de la reacción de la mezcla.

## **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Mejorar las propiedades del concreto mediante una puzolana llamada zeolita de origen natural para que sea utilizada en pavimento rígido.

## CAPÍTULO II . - FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 Puzolanas

Las puzolanas son materiales con un contenido silíceo o silicoaluminoso que reaccionan con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar productos de hidratación cementoso. Las características que influyen en su reactividad son las siguientes: i) tamaño de sus partículas, ii) contenido de sílice y alúmina, y iii) área específica (Walker y Pavia, 2010). Talero (1986) agrega que al sustituir un porcentaje de cemento por puzolanas esto influencia tanto en al estado fresco, como en al estado endurecido de las pastas, mortero o concretos. Las características que determinan son tanto la morfología de sus partículas, como de su constitución química. En general contienen una fase vítrea reactiva constituida principalmente por alúmina y sílice reactiva, que da origen a su carácter químico que las hace aptas para desempeñarse mejor o peor frente a diferentes medios agresivos. Las puzolanas de carácter aluminico se desempeñan mejor frente al ataque de los cloruros; mientras que las de carácter silíceo se desempeñan mejor frente al ataque de los sulfatos.

La actividad puzolánica se describe por convención como una medida del grado de reacción a lo largo del tiempo entre una puzolana y  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en presencia de agua (Takemoto y Uchikawa, 1980). La fuerza impulsora subyacente a la actividad puzolánica es la diferencia en la energía libre de Gibbs entre la etapa inicial y final de la reacción, mientras que la reacción cinética está gobernada por la barrera de energía de activación que debe superarse para continuar en la reacción (Felipe *et al.* 2001).

Stulz y Mukerji(1993) agregan que existen 2 tipos de puzolanas: las artificiales y las volantes. Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas de actividades volcánicas geológicamente recientes. Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado (pfa), escoria de altos hornos granulada y molida (ggbfs), y ceniza de cascara de arroz (RHA). Estos autores también mencionan que se puede sustituir la cantidad de cemento por puzolanas en un 15-40% sin reducir significativamente su resistencia.

En la norma ASTM C 618 se menciona la posibilidad de uso de ceniza volante, la puzolana natural, cruda o calcinada. En este documento las puzolanas se clasifican en tres clases que se muestran a continuación:

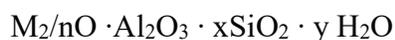
- La N son las puzolanas naturales o calcinadas: tierras diatomeas, sílice opalina y esquistos arcillosos; tobas, cenizas volcánicas y pumicitas; arcillas calcinadas.
- La F identifica a la ceniza volante de la combustión del carbón antracítico o bituminoso.
- La C es la ceniza volante puzolánica y cementante a la vez, producto de la combustión de carbón lignítico y subbituminoso.

### 2.1.1 Zeolita

Una zeolita es un aluminosilicato cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento que permiten el intercambio iónico y la deshidratación reversible (Bosch y Schifter 2003). Sherry (2003) complementa agregando que los movimientos de los iones dependen de: i) La naturaleza de las especies catiónicas, principalmente de su carga; ii) La temperatura, iii) La concentración de las especies catiónicas en solución, iv) El tamaño del ión y su carga, v) Las especies aniónicas asociadas al catión en solución, vi) El solvente (la mayor parte de los intercambios se efectúan en solución acuosa, aunque también algo se hace con solventes orgánicos); vii) Las características estructurales de la zeolita en particular.

Su estructura fisicoquímica varía, o sea: no existe un tipo estructural único para las zeolitas, están compuestas por tetraedros formados por un catión y cuatro átomos de oxígenos, es decir:  $TO_4$ . El catión, T, puede ser silicio (Si), aluminio (Al) o incluso germanio (Ge), aunque el silicio predomina. Al estar interconectados los tetraedros, su fórmula es  $TO_2$  ya que tetraedros adyacentes comparten oxígenos. Debido a que el aluminio tiene cargas más bajas que el silicio, la inclusión de aluminio es compensada químicamente por la inclusión de K, Na y Ca o menos frecuentemente por Li, Mg, Sr y Ba.

Costafreda (2014) menciona que la fórmula empírica de las zeolitas es la siguiente:



Donde: M: es un catión de valencia n; x: es el número de átomos de aluminio;  
 y: es el número de átomos de silicio; x: toma valores entre 2 y 10; y: toma valores entre 2 y 8.

Georgiev *et al.* (2009) menciona que la estructura de la zeolita se encuentra construida primariamente como la estructura que se muestra en la figura II.1.

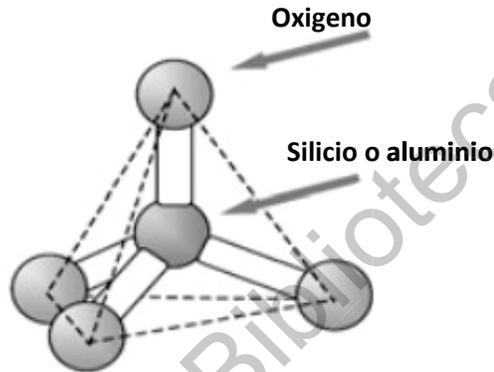


Figura II-1.- Unidad de construcción primaria de estructura de zeolita.

Fuente: Georgiev *et al.* (2009)

Meier (1968) propuso una clasificación estructural de las zeolitas apoyándose en estudio cristalográficos, la cual está basada en la existencia de 8 unidades secundarias de construcción. La clasificación se muestra en la tabla II.1.

Tabla II.1.- Comparación de propiedades de diferentes zeolitas.

Grupo C4 (Grupo de la filipsita)			Grupo C8-T1 (Grupo de la mordenita)			Grupo C6-C6 (Grupo de la mordenita)			
Zeolita	TO4	Si/Al	Zeolita	TO4	Si/Al	Zeolita	TO4	Si/Al	
Li-ABW	8	1-3	Bikitaita	9	4-7	Linde	24	1-3	
Filipsita	16		Dischiardita	24		Rho	46		
Harmotoma	16		Epistilbita	24		ZK5	96		
Gismondita	16		Ferrierita	36		Faujasita	192		
Na-P	16		Mordenita	48		Paulingita	672		
Amicita	16		ZSM-5	96		<20	Linde N		768

Tabla II.2.- Continuación

Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawarlita	16							
Merlionita	32							
Grupo C4-C4 (Grupo de la analcima)			Grupo C6 (Grupo de la chabazita)			Grupo C4-C4 (Grupo de la heulandita)		
Analcima	48	1-3	Sodalita	12	2,5-4,0	Brewsterita	16	2,2-5,0
Leucita	48		Cancrinita	12		Heulandita	36	
Wairakita	48		Ofrerita	18		Estilbita	72	
A	48		Losod	24		Stellerita	72	
Grupo C4-T1 (Grupo de la natrolita)			Gmelinita	24		Barretita	72	
Edingtonita	10	1-2	Lisotita	36		Grupo CS (grupo de la laumontita)		
Gonnardita	20		Chabazita	36		Laumontita	24	01-feb
Thomsonita	40		Mazzita	36				
Natrolita	40		Erionita	36				
Scolecitta	40		Aghanita	48				
Mesolita	120		Levynita	54				

Fuente: Meier. (1968)

TO4: Número de tetraedros por celda unitaria

Si/Al Relación silicio-aluminio en el grupo estructural.

Bosch y Schifter (2003) mencionan que existen cerca de 50 tipos de zeolitas que varían en sus propiedades físicas y químicas en la tabla II.2 se muestran algunas de ellas.

Tabla II.3.- Diferentes propiedades físicas y químicas de zeolitas.

Clasificación	Composición química	Volumen de poro (cm <sup>3</sup> de agua/ cm <sup>3</sup> de Cristal)
<b>Grupo de las analcimas</b>		
Analcimas	Na <sub>16</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>32</sub> O <sub>92</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.18
Wairakita	Ca <sub>8</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>32</sub> O <sub>92</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.18
Leucita	K <sub>16</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>32</sub> O <sub>92</sub> )	0
<b>Grupo de las natrolitas</b>		
Natrolita	Na <sub>16</sub> (Al <sub>16</sub> Si <sub>24</sub> O <sub>80</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.21
Edingtonita	Ba <sub>16</sub> (Al <sub>4</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>20</sub> )6H <sub>2</sub> O	0.35
Thomsonita	Na <sub>16</sub> Ca <sub>8</sub> (Al <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> O <sub>80</sub> )24H <sub>2</sub> O	0.32
<b>Grupo de las filipstias</b>		
Filipsita	(K,Na) <sub>5</sub> (Al <sub>5</sub> Si <sub>1</sub> O <sub>32</sub> )10H <sub>2</sub> O	0.3
Garronita	NaCa <sub>2.5</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>10</sub> O <sub>32</sub> )14H <sub>2</sub> O	0.41
Gismondina	Ca <sub>4</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>32</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.47
<b>Grupo de las heulanditas</b>		
Heulandita	Ca <sub>4</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>28</sub> O <sub>72</sub> )24H <sub>2</sub> O	0.35
Clinoptilolita	Na <sub>6</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>30</sub> O <sub>72</sub> )24H <sub>2</sub> O	0.34
Estilbita	Na <sub>2</sub> Ca <sub>4</sub> (Al <sub>10</sub> Si <sub>26</sub> O <sub>72</sub> )32H <sub>2</sub> O	0.38
<b>Grupo de las mordenitas</b>		
Mordenita	Na <sub>8</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>40</sub> O <sub>96</sub> )24H <sub>2</sub> O	0.26
Ferrierita	Na <sub>1.5</sub> Mg <sub>2</sub> (Al <sub>5.5</sub> Si <sub>30.5</sub> O <sub>72</sub> )18H <sub>2</sub> O	0.24
Epistilbita	Ca <sub>8</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>18</sub> O <sub>48</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.34
<b>Grupo de las chabasitas</b>		
Chabasita	Ca <sub>2</sub> (Al <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>24</sub> )13H <sub>2</sub> O	0.48
Erionita	(Ca,Mg,Na,K,Na) <sub>4.5</sub> (Al, Si <sub>27</sub> O <sub>72</sub> )27H <sub>2</sub> O	0.36
Zeolita L	Ca <sub>8</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>18</sub> O <sub>48</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.28
<b>Grupo de las faujasitas</b>		
Faujasitas (X, Y)	Na <sub>12</sub> Ca <sub>12</sub> Mg <sub>11</sub> (Al <sub>59</sub> Si <sub>133</sub> O <sub>384</sub> )26H <sub>2</sub> O	0.53
Zeolita A	Na <sub>12</sub> (Al <sub>12</sub> Si <sub>12</sub> O <sub>48</sub> )24H <sub>2</sub> O	0.47
Zeolita ZK-5	Na <sub>30</sub> (Al <sub>30</sub> Si <sub>66</sub> O <sub>192</sub> )98H <sub>2</sub> O	0.45

Fuente: Bosch y Schifter (2003)

Tabla II.2.- Continuación

Clasificación	Composición química	Volumen de poro (Cm <sup>3</sup> de agua / Cm <sup>3</sup> de Cristal)
<b>Grupo de las laumontitas</b>		
Laumontita	Ca <sub>4</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>16</sub> O <sub>48</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.35
Yugawaralita	Ca <sub>2</sub> (Al <sub>8</sub> Si <sub>20</sub> O <sub>56</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.3
<b>Grupo de las pentasil</b>		
Zeolita ZSM-5	Na <sub>n</sub> (Al <sub>n</sub> Si <sub>96-n</sub> O <sub>192</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.32
Zeolita ZSM-11	Na <sub>n</sub> (Al <sub>n</sub> Si <sub>96-n</sub> O <sub>192</sub> )16H <sub>2</sub> O	0.32

Fuente: Bosch y Schifter (2003)

Demuth *et al.* (2000) menciona que las zeolitas se pueden clasificar dependiendo del diámetro de sus poros de la siguiente manera: i) Zeolita de poro extragrande ( $\theta > 9$ ), ii) Zeolita de poro grande ( $6 < \theta < 9$ ), iii) Zeolita de poro mediano ( $5 < \theta < 6$ ), iv) Zeolita de poro pequeño ( $3 < \theta < 5$ ). Pavelić y Hadžija (2003) mencionan que esta propiedad influye a la hora de definir su importancia y que la regularidad de su estructura es utilizada para tamizar moléculas, atrapar compuestos y absorber gases.

Costafreda *et al.* (S.F.) menciona que actualmente las zeolitas son conocidas por su multifuncionalidad, o en otras palabras, por su fácil adaptación a diferentes campos como la salud, nanotecnología, agroindustria, química, construcción y otras disciplinas más. Esto es posible debido a su composición relativamente sencilla de minerales, su gran estabilidad físico-química y sus propiedades diversas, entre las que descuella su carácter como intercambiador iónico.

Costafreda *et al.* (2011) realizó una comparativa de las propiedades de las zeolitas de México, Cuba y España. En la tabla II.3 se muestran los resultados.

Tabla II.4.- Clasificación estructural de las zeolitas.

Muestras	Fracciones Granulométricas		Densidad real de las partículas	Densidad aparente de las partículas	Absorción de agua WA 24
	Fracción (di/Di)mm	(%)	(Mg.m-3)	1.27	(%)
ZEO-MÉXICO	4-10	100	2.2	1.79	33.22
ZEO-CUBA	4-10	100	2.31	1.57	12.61
ZEO-ESPAÑA	4-10	100	2.31	2.59	20.36
ARIDO-REF	-	-	2.62	-	0.53

Fuente: Costafreda *et al.* (2011)

Las ventajas de utilizar zeolita como material cementante suplementario en cemento son las siguientes: i) mejora en la disminución del calor de hidratación (Sánchez de rojas y Frías, 1996), ii) mejora en la durabilidad (Malhotra y Mehta, 1996), iii) resistencia a los sulfatos (Janotka y Krajci, 2008) y reducción en costos de energía (Valipur *Et al.*, 2013).

Otras funciones que se le pueden dar a la zeolita natural hoy en día son las siguientes: i) puede ser utilizada como material de mezclado para resolver los problemas de estabilidad de volumen de la pasta de cemento endurecida (Feng *et al.*, 1979), ii) puede prevenir el sangrado, segregación y deslaminación del concreto fresco para facilitar el proceso de bombeo (Feng, 1993), iii) puede disminuir la permeabilidad del concreto endurecido y mejorar durabilidad, especialmente la resistencia a la reacción del agregado alcalino (Feng y Jia, 1995); puede minimizar el agrietamiento causado por auto-contracción en concreto de alto rendimiento (Feng, 1987).

## 2.2 Pavimentos

Rico (2006) menciona que un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales; así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos

producidos por las cargas impuestas por el tránsito. Gutiérrez de López (2003) agrega que el pavimento debe hacer posible el tránsito de vehículos con comodidad, seguridad y economía previstas en el proyecto.

A partir de esta definición se puede determinar que existen dos tipos básicos de pavimentos: los pavimentos flexibles y los pavimentos rígidos.

### **2.2.1 Capas de los pavimentos**

Salazar (2015) menciona que las capas de un pavimento son la subrasante, Sub-base y la base. A continuación, se muestra la definición de cada una de ellas según el mismo autor.

#### **Subrasante:**

Esta capa es el terreno de cimentación del pavimento, puede estar compuesta por suelo natural, o en casos de que el suelo natural sea deficiente se puede utilizar material seleccionado de relleno o incluso se le puede realizar alguna estabilización o modificación al material natural.

#### **Sub-base:**

Esta capa está compuesta por materiales pétreos, de buena graduación, se encuentra construida sobre la subrasante. Esta capa es la que subyace a la capa base, cuando esta es necesaria, como es el caso de los pavimentos flexibles. Normalmente, la sub-base se construye para lograr espesores menores de la capa base, en el caso de pavimentos flexibles. En el caso de pavimentos de concreto, en muchos casos resulta conveniente colocar una capa sub-base cuando las especificaciones para pavimento son más exigentes.

#### **Base:**

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente se le usa en los pavimentos flexibles. Se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica. Esta capa permite reducir los espesores de carpeta, dada su función estructural importante al reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores. Además, cumple una función drenante del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

### 2.2.2 Pavimentos flexibles

Según Rico (1992), los pavimentos flexibles son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes (ver Figura II.2).

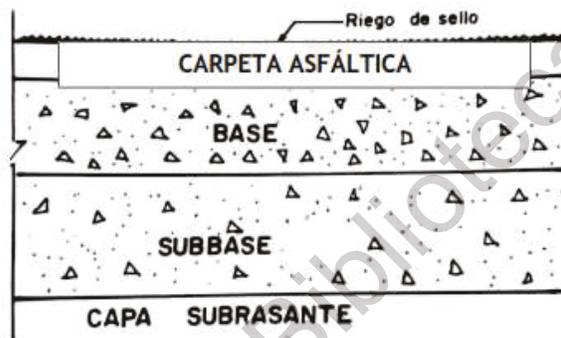


Figura II-2.- Capas que forman en general un pavimento flexible.

Fuente: Olivera (1986).

Por otro lado, Montejo (1998) menciona que este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas: la base y la sub-base. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

### 2.2.3 Pavimentos rígidos

Montejo (1998) dice que un pavimento rígido es aquel que fundamentalmente está constituido por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como a su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es lo suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante (ver Figura II.3).

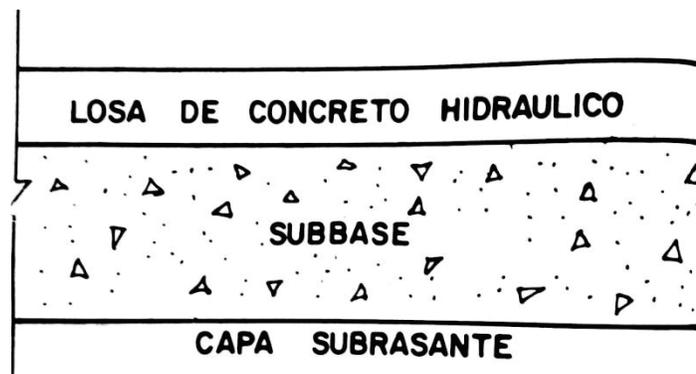


Figura II-3.- Capas que forman un pavimento rígido.

Fuente: Olivera (1986).

#### 2.2.4 Método de diseño PCA para pavimentos rígidos. Método de la Portland Cement Association (PCA)

El método Portland Cement Association (PCA) se ha estructurado para determinar el espesor adecuado de losas de concreto de cemento Portland, las cuales soportarán las cargas del tránsito en calles, carreteras y autopistas. El objetivo principal del método PCA es obtener la solución apropiada y menos costosa considerando el ciclo de vida del proyecto. El criterio del diseño está basado en el comportamiento observado en los pavimentos y en el modelo de elementos finitos.

### 2.3 Concreto

Gutiérrez de López (2003) menciona que los orígenes de concreto se remontan a dos siglos A. de C. en Roma cuando utilizaron mezclas de caliza calcinada, tobas volcánicas y piedras para construir algunas de las estructuras que hoy todavía subsisten, como el Panteón o Iglesia de Santa María de los Mártires, (cuya cúpula de 44 metros de claro es de concreto simple); la cúpula está aligerada por medio de casetones. En el siglo VII de nuestra era, con la caída del Imperio Romano, se olvidó su uso. En el siglo XVIII es redescubierto por los ingleses cuando en 1756 John Smeaton lo utilizó para la reconstrucción del Faro de Edystone en la costa sur de Inglaterra.

#### 2.3.1 Definición

Sánchez (2001) y Salazar (2009) concuerdan diciendo que el concreto u hormigón es la mezcla entre un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregado o árido), agua y, en algunos casos, aditivos que al endurecerse forman una piedra artificial compacta y, que después de un tiempo, es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión. El concreto, al igual que las piedras naturales, presenta una alta resistencia a la compresión, pero una baja resistencia a la tracción (generalmente es el 10% de su resistencia a la compresión) por lo que, en algunos casos, es necesario reforzarlo con acero para que puedan soportar estos esfuerzos. Cuando se refuerza con acero recibe el nombre de concreto armado.

Debido a que el concreto está constituido por materiales heterogéneos, está sujeto a la influencia de numerosas variables. Las variables que juegan un papel clave en la resistencia y otras propiedades del concreto son diferentes dosificación, mezclado, colocación, curado, entre otras (Neville, 1999).

La composición del concreto se establece mediante los siguientes parámetros: i) clase concreto que es indicada por el diseñador, ii) tipo de cemento, iii) tipo de aditivo según los requisitos del proyecto, iv) consistencia de concreto según el tipo de elemento en el cual se va utilizar, vi) impermeabilidad, vii) resistencia a la congelación, viii) máxima relación agua-cemento y la dosis mínima de cemento según el requisito mínimo para garantizar la durabilidad (Badea y Lures ,S.F.).

### **2.3.2 Componentes del concreto**

Los componentes del concreto son: cemento, agua, arena, grava y aditivos, en los casos que se requieran. Estos componentes son mezclados homogéneamente para crear el concreto.

#### **2.3.2.1 Cemento**

Sánchez (2001) dice que el cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten ser compacto con resistencia y durabilidad adecuadas; además, tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química. A este proceso se le llama hidratación, por este

motivo este tipo recibe el nombre de cemento hidráulico. El cemento es el elemento activo en una mezcla de concreto o mortero.

Otra definición del cemento, según la normativa española UNE-EN 197-1:2011, es la siguiente: son conglomerantes hidráulicos (es decir, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral) que finamente molidos y convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes que, como resultado final, dan lugar a productos hidratados mecánicamente y que además son resistentes y estables, tanto al aire como al agua.

El cemento es el constituyente fundamental del concreto de cemento Portland ya que es el que actúa como ligante de toda la masa al mezclarse con agua. El contenido de cemento debe ser superior a  $200 \text{ kg/m}^3$  (concreto en masa),  $250 \text{ kg/m}^3$  (concreto armado) ó  $275 \text{ kg/m}^3$  (concreto pretensado); si bien estos contenidos deben ser elevados cuando el material se exponga a ambientes potencialmente agresivos. El límite máximo se sitúa en  $400 \text{ kg/m}^3$ , y sólo podrá superarse en casos especiales avalados por la experimentación (Gutiérrez, 2003).

El cemento no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos minerales. Cuatro de ellos conforman el 90 %, o más, del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico. Los diversos tipos de cemento contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes. Los dos silicatos de calcio constituyen cerca del 75% del peso del cemento y reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio (Kosmatka y Panarese, 1992).

#### **2.3.2.1.1 Tipos de cementos**

La clasificación de los tipos de cementos con base a la normativa NTC 30 se muestra en la tabla II.4.

Las características nombradas en cada tipo de cemento se obtienen variando las proporciones de los compuestos en el clínker y esto se logra partiendo de la dosificación de las materias primas.

Tabla II.5.- tipos de cementos y sus características.

Tipo de cemento	Características
<b>Cemento Portland tipo 1</b>	Es el destinado a obras de concreto y, en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
<b>Cemento Portland tipo 1M</b>	Se utiliza para alcanzar resistencias superiores a las del tipo 1.
<b>Cemento Portland tipo 2</b>	Es resistente a la acción moderada de sulfatos y el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales.
<b>Cemento Portland tipo 3</b>	Alcanza una alta resistencia inicial.
<b>Cemento Portland tipo 4</b>	El desprendimiento de calor es bajo.
<b>Cemento Portland tipo 5</b>	Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
<b>Cemento Portland Blanco</b>	Se elabora con materias primas seleccionadas que no contienen óxido de hierro; a eso se debe la coloración. Se usa para decoración.
<b>Cemento Portland 1 A, 1MA, 2A y 3 A</b>	Corresponden a los ya indicados con adición de material incorporador de aire.
<b>Cementos Portland Puzolánicos</b>	Son resistentes a los sulfatos y desprenden bajo calor de hidratación. La reacción de hidratación es lenta, las resistencias alcanzadas con los cementos siderúrgicos y puzolánicos son tardías con respecto a las obtenidas con los cementos Portland.

Fuente: NTC 30.

### 2.3.2.2 Agregados

Los agregados son gravas, piedras y arenas que forman la estructura granular, en la cual se busca que sus vacíos se llenen lo más posible con el pegamento aglutinante, estos agregados hacen aproximadamente el 80% del peso y el 70-75% del volumen del concreto. El uso óptimo del tamaño y la calidad de los agregados mejoran la calidad del concreto. Los agregados pueden ser de origen natural o artificial.

Los agregados de concreto adecuados son materiales que no interfieren con el endurecimiento del cemento, tienen una unión lo suficientemente fuerte con la pasta del cemento endurecida y no ponen en riesgo la resistencia del concreto (SIKA, 2013).

Gutiérrez (2003) complementa la información anterior mencionando que la razón principal de la utilización de agregados en una mezcla de concreto es que estos actúan como un material de relleno, haciendo la mezcla más económica. Otra razón es que los agregados combinados con la pasta fraguada proporcionan una parte de la resistencia mecánica, debido a que estos tienen una resistencia propia que aportan al concreto como masa endurecida. Y, por último, otra función de los agregados es que cuando el concreto pasa del estado plástico al estado endurecido, durante el proceso de fraguado, los agregados controlan los cambios volumétricos de la pasta evitando que se generen agrietamientos por retracción plástica que pueden afectar la resistencia del concreto.

#### **2.3.2.2.1 Agregados grueso**

Puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una combinación entre dichos materiales con partículas de tamaño máximo, generalmente comprendido entre  $\frac{3}{4}$ " y 3" pudiendo contener fragmentos de roca y arena (N-CMT-2-02-002/02).

Hasta para resistencias de 250 kg/cm<sup>2</sup> se debe usar el mayor tamaño posible del agregado grueso. Para resistencias mayores, investigaciones recientes han demostrado que se requiere el menor consumo de cemento y que la mayor eficiencia se obtiene con agregados de menor tamaño. En concreto de alta resistencia, mientras más alta sea esta, menor deberá ser el tamaño máximo para que la eficiencia sea máxima. Para cada resistencia existe un margen estrecho del valor del tamaño máximo por debajo del cual es necesario aumentar el contenido del cemento. En concretos de baja y mediana resistencia mientras mayor sea el tamaño mayor es la eficiencia.

Una adecuada densidad aparente está entre 2.3 y 2.9 g/cm<sup>3</sup>. Cuanto mayor es su densidad mejor es su calidad y menor su absorción, que oscila entre 1 y 5% Gutiérrez (2003).

#### **2.3.2.2.2 Agregados fino**

La normativa mexicana N-CMT-2-02-002/02 define al agregado fino como arena natural seleccionada y obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros y 4.75 milímetros, aunque pueden contener finos de menor tamaño.

Gutiérrez (2003) menciona que una función de la arena es como llenante. Además, actúa como lubricante sobre el que ruedan los agregados gruesos, dándole manejabilidad al concreto. La falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de ella demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua se necesita mayor cantidad de cemento para conservar una satisfactoria relación agua-cemento.

#### **2.3.2.3 Agua**

Un componente esencial en las mezclas de concreto es el agua ya que permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante. El agua que se utiliza en la elaboración de concretos debe ser libre de aceite, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas. Salazar (2015) agrega que el P.H. del agua debe estar en el rango de 6.0-9.2 y debe ser apta para consumo humano. Para cada cantidad de cemento existe una cantidad de agua requerida para la hidratación del cemento; el resto del agua sólo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y se pueda obtener la manejabilidad adecuada de las mezclas frescas. El agua adicional es una masa que queda dentro de la mezcla y que, cuando se fragua el concreto, crea porosidad, lo que reduce la resistencia (Gutiérrez, 2003).

Salazar (2015) dice que los límites adecuados dependerán de la agresividad del medio ambiente, pero se recomienda que no se superen los siguientes valores: i) 1.2 kg de ion Cl<sup>-</sup> por metro cúbico de concreto reforzado y 0.60 kg de ion SO<sub>4</sub> por metro cúbico de concreto mezclado.

Gutiérrez (2003) agrega que, en el caso de concretos reforzados, el agua de mar incrementa el riesgo de corrosión del acero de refuerzo, especialmente en países tropicales, y su uso se restringe a situaciones inevitables. En el concreto pre-esforzado, no se permite el agua del mar debido a que la pequeña sección transversal de los cables hace que los efectos de la corrosión sean más graves.

#### **2.3.2.4 Aditivos de concreto:**

IMCYC (2006) define a los aditivos como químicos que se agregan al concreto en la etapa de mezclado con el fin de mejorar algunas de sus propiedades. De igual manera, Nagrockiene *et al.* (2017) concuerdan con esto y añaden que los diferentes tipos de aditivos del concreto son utilizados para controlar las propiedades tecnológicas de las diferentes mezclas de concreto, así como también sus propiedades físicas y mecánicas de concreto ya endurecido.

Los tipos de aditivos según la ASTM C494 son los siguientes: i) Reductores de agua, ii) Retardantes, iii) Aceleradores, iv) Reductores de agua y retardantes, v) Reductores de agua y aceleradores, vi) Reductores de agua alto rango, vii) Reductores de agua alto rango y retardantes y viii) Desempeño especial.

#### **2.4 Concretos con zeolita:**

Bohac *et al.* (2016) monitoreó los flujos de calor en la etapa de hidratación de pastas de cemento, con y sin zeolita, llegando a las conclusiones de que la aceleración de la hidratación antes del tiempo pico del flujo de calor y la siguiente desaceleración es proporcional al contenido de zeolita. La presencia de zeolita en el cemento promueve la formación de AFT, que da como resultado el aumento de la elasticidad de la pasta fresca al comienzo del proceso de hidratación.

Markvic *et al.* (2016) realizó pruebas de concretos con cemento CEM I 42:5R y con zeolita clinoptilolita con la composición química que se muestra en la tabla II.5.

Tabla II.6.- Composición química del cemento Portland y zeolita natural.

Cemento Portland (CEM I 42.5R)				Zeolita natural			
Composición Química	%	Mineralogía	%	Composición Química	%	Mineralogía	%
SiO <sub>2</sub>	20.17	C3S	59.76	SiO <sub>2</sub>	75.34	Clinoptilolita	60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.41	β-C2S	18.12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.77	Cuarzo	30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.39	C3A	6.76	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	Otros	10
CaO	63.45	C4AF	10.91	CaO	4.6		
MgO	2.41			MgO	0.55		
SO <sub>3</sub>	3.21			SO <sub>3</sub>	0.05		
Na <sub>2</sub> O	0.17			Na <sub>2</sub> O	1.22		
K <sub>2</sub> O	1.02			K <sub>2</sub> O	2.41		

Fuente: Markvic *et al.* (2016).

Se realizaron mezclas utilizando porcentaje de zeolita desde 0% a 10% y, en algunos casos, utilizando un aditivo superplastificante; además de un agente inclusor de aire. Las porciones que se utilizaron se muestran en la tabla II.6. Las siguientes mezclas son válidas utilizando agregados finos=660 kg/m<sup>3</sup>, agregados gruesos(2-8mm) =450kg/m<sup>3</sup>, agregado grueso(8-16mm)=700kg/m<sup>3</sup> y con una relación agua-cemento de 0.5. A estos especímenes se les realizaron pruebas de compresión simple, resistencia a la flexión, ciclos de congelación y descongelación, pruebas de penetración de agua, encogimiento. Y, finalmente, se pudo concluir que, durante los primeros 90 días, la resistencia a la compresión disminuye, pero después de los 90 días aumenta. Los concretos con zeolita aumentan su resistencia a la flexión. Los concretos con zeolita presentan un menor encogimiento y aumentan su resistencia a la congelación, aunque después de un ciclo de congelación su resistencia disminuye.

Tabla II.7.- Características de las mezclas utilizadas.

Mezcla	Cemento Portland (kg/m <sup>3</sup> )	Zeolita natural (% de cemento)	Zeolita natural (% de cemento)	Plastificante (% de cemento)	Agente inclusor de aire (%)	Contenido de aire (%)
<b>Z0P</b>	350	0	–	1.22	–	2.4
<b>Z0PA</b>	350	0	–	1.22	0.3	5.1
<b>Z10P</b>	315	35	10	1.64	–	2.4
<b>Z10PA</b>	315	35	10	1.64	0.3	4

Fuente: Markvic *et al.* (2016).

De igual modo, Nagrockiene y Girskas (2016) investigaron las propiedades del concreto modificado con zeolita, las propiedades químicas del cemento (CEM I 42.5R) y las de la puzolana utilizada. Estas son las que se muestran en la tabla II.7.

Tabla II.8.- Composición química del cemento Portland y zeolita natural.

Composición Química	%	Composición Química	%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20.76	SiO <sub>2</sub>	71.5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6.12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.1
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.37	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9
<b>CaO</b>	63.5	CaO	2.1
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1	K <sub>2</sub> O	2.45
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.8	SO <sub>3</sub>	-
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.3	Na <sub>2</sub> O	0.8
<b>H<sub>2</sub>O</b>	-	H <sub>2</sub> O	8.08
<b>MgO</b>	-	MgO	1.07
<b>Otros</b>	4.45	Otros	-

Fuente: Nagrockiene y Girskas (2016).

Los agregados que se utilizaron son arena 0/4 y grava 4/16. Sus propiedades físicas se muestran en la tabla II.8.

Tabla II.9.- Propiedades físicas de los agregados.

<b>Agregado</b>	<b>Densidad de partículas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción de agua (%)</b>
Arena	2588	1543	1.29
grava	2339	1581	0.58

Fuente: Nagrockiene y Girskas (2016).

Además, se le agrego un aditivo superplastificante a base de resina de Policarboxílico con las siguientes características: i) Concentración de la resina en la solución 36.1%, ii) PH de 5.05, iii) Conductividad eléctrica 1.48 mS/cm y una densidad de la solución de 1040 kg/m<sup>3</sup>. Las cantidades de los agregados, cemento, agua, plastificante se muestran en la tabla II.9.

Tabla II.10.- Composición del concreto 1m<sup>3</sup>.

<b>Zeolita (%)</b>	<b>Zeolita (kg)</b>	<b>Cemento (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>Grava (kg)</b>	<b>Agua (kg)</b>	<b>Plastificante (kg)</b>	<b>W/C</b>
0	0	371	1158	811	130	1.855	0.45
2.5	9.3	361.7	1158	811	130	1.855	0.45
5	18.6	352.5	1158	811	130	1.855	0.45
7	27.9	343.2	1158	811	130	1.855	0.45
10	37.1	333.9	1158	811	130	1.855	0.45

Fuente: Nagrockiene y Girskas (2016).

Realizando las pruebas mencionadas anteriormente a las distintas mezclas, se llegó a la conclusión de que los concretos con 10% de zeolita aumentan la resistencia de un 13.3% a un 15% después de los 28 días de curado. El resultado máximo y mínimo de resistencia a la compresión fue 79.4 Mpa y 70.1 Mpa. La modificación de concreto con aditivos naturales de zeolita en 10% mejora la durabilidad del concreto hasta 3.3 veces. Los concretos con

zeolita tienen menor absorción de agua y mayor porosidad cerrada, lo que ocasiona que mejore su resistencia a los ciclos en congelamiento.

Najami *et al.* (2012) también realizaron pruebas de concreto con zeolita con el fin de reducir la cantidad de cemento Portland ya que el cemento es responsable de aproximadamente del 7% de dióxido de carbono que se genera en el mundo. La composición de la zeolita y cemento utilizado en el estudio se muestran en la tabla II.10.

Tabla II.11.- Composición del cemento y zeolita.

	Composición Química		Composición mineral		
	Cemento %	Zeolita %	Cemento %	Zeolita %	
CaO	61.32	1.68	clinoptilolita	-	70.6
SiO <sub>2</sub>	21.68	67.79	Ópalo	-	18.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85	13.66	Cuarzo	-	1.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.4	1.44	plagioclasa	-	2.4
MgO	2.6	1.2	k- feldespato	-	1.5
Na <sub>2</sub> O	0.25	2.04	esmectita/illita	-	5.2
K <sub>2</sub> O	0.71	1.42			
SO <sub>3</sub>	1.9	0.52			

Fuente: Najami *et al.* (2012).

Los autores realizaron 3 mezclas, las cuales contienen una relación de agua-cemento de 0.50, la cantidad de agua de 175kg/m<sup>3</sup>, de agregado fino de 870kg/m<sup>3</sup> y agregado grueso de 870 kg/m<sup>3</sup>. En la tabla II.11 se muestran las proporciones de la mezcla.

Tabla II.12.- Proporciones de la mezcla.

Mezcla	Zeolita natural (%)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Zeolita natural (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastificante (%)	Densidad fresca (kg/m <sup>3</sup> )
NZ0(control)	-	350	0	0	2318
NZ15	15	297.5	52.5	0.4	2310
NZ30	30	245	105	1.2	2291

Fuente: Najami *et al.* (2012).

A las mezclas mostradas en la tabla II.9 se les realizaron las pruebas de compresión, penetración de cloruros, absorción de agua, etc. En la prueba de compresión se obtuvo una

resistencia máxima de 45.6 Mpa y una mínima 10 Mpa en los especímenes con zeolita. En todas las etapas la resistencia fue menor a la del espécimen de control. En la prueba de penetración de agua, la penetración en todas las etapas fue menor a las del espécimen de control. En la prueba de porcentaje de absorción de agua se obtuvo la conclusión de que es mayor en los especímenes con zeolita, en la penetración de los cloruros y en los especímenes fue menor. Mediante esto se llegó a la conclusión de la efectividad de usar zeolita para reducir la permeabilidad de iones de cloruros.

Se llegó a las siguientes conclusiones: al adicionar zeolita al concreto pierde trabajabilidad y disminuye el tiempo en el que el concreto empieza a endurecerse; los concretos con zeolita mostraron menores resistencias a la compresión en todas las etapas en comparación al espécimen de control; se descubrió un rendimiento no satisfactorio en concretos con zeolita en un ambiente ácido; por otro lado los aspectos que mejoraron fueron: la penetración de iones de cloruro, la velocidad de corrosión, la contracción por secado y la penetración de agua. Por último, los concretos con 15% de zeolita son muy prometedores, aunque su resistencia a la compresión es menor, es bastante viable y no requiere demasiado superplastificante.

Eskandari *et al.* (2015) realizó experimentos en especímenes de concreto con nano sílice y micro zeolita variando en las proporciones que se muestran en la tabla II.12.

Tabla II.13.- Proporciones de la mezcla.

Mezcla	W/C	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Micro zeolita (%)	Nano Sílice (%)	Superplastificante (%)
Z0S0-0.45	0.45	899	727	378	-	-	0.3
Z0S0-0.4	0.4	881	886	430	-	-	0.4
Z5S2-0.45	0.45	899	727	378	5	2	0.7
Z8S2-0.45	0.45	899	727	378	8	2	0.9
Z10S2-0.45	0.45	899	727	378	10	2	0.11
Z5S2-0.4	0.4	881	866	430	5	2	0.9
Z8S2-0.4	0.4	881	866	430	8	2	1.2
Z10S2-0.4	0.4	881	866	430	10	2	1.4

Fuente: Eskandari *et al.* (2015)).

En los resultados de las pruebas de compresión ninguno de los especímenes de zeolita y sílice logró superar a los especímenes de control en ninguna de las etapas de 7,28 y 90 días. Los especímenes con zeolita y sílice con los mejores resultados fueron el espécimen Z10S20-45, que logró obtener los resultados más altos a los 90 días obteniendo una resistencia de 53 Mpa; a los 28 días el espécimen con el resultado más alto fue el Z10S2-0.4 con una resistencia de 45.3 Mpa; y a los 7 días el mejor desempeño se logró en el Z8S2-0.4 con una resistencia de 30.5 Mpa. Sin embargo, en la prueba de resistencia a la tensión todos los especímenes con zeolita y sílice superaron a los especímenes de control, con excepción del Z8S2-0.45, en el caso de la resistividad eléctrica y penetración de cloruros todos los especímenes con zeolita y sílice tuvieron mejor comportamiento.

Con esto se llega a la conclusión de que, en cuestiones mecánicas, sustituir materiales por micro zeolita y nano sílice no es efectivo; sin embargo, para cuestiones de durabilidad sí se encontró una considerable mejoría en estas mezclas.

Malolepszy y Grabowska (2015) realizaron especímenes de mortero agregándoles una zeolita en 25 y 40%. Después, realizaron la prueba de resistencia de sulfatos, en la cual dejaron a los morteros expuestos a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Sulfato de sodio). En las pruebas se obtuvo que los morteros tuvieron una menor expansión que el mortero de control. El mortero de control sufrió destrucción completa a las 44 semanas de estar expuesto. En la figura II.4 se muestran los especímenes después de 32 semanas de exposición.

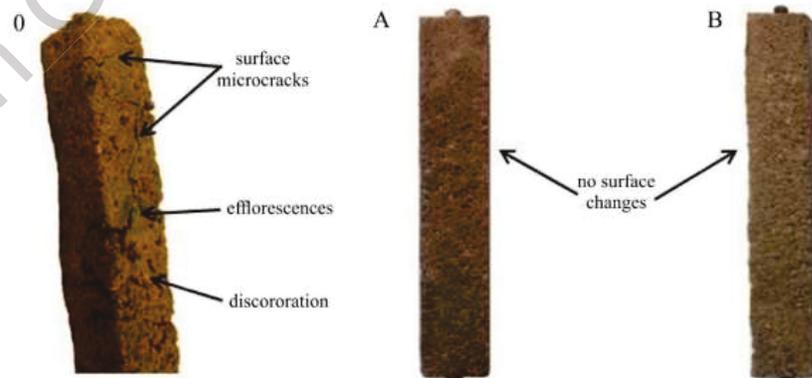


Figura II-4 Observación visual de especímenes de mortero después de 32 semanas de exposición.

Fuente: Malolepszy y Grabowska (2015)

Se concluyó que, en efecto, la zeolita es muy efectiva cuando se trata de aumentar la resistencia al ataque de sulfatos, en el cual se notó que los especímenes con zeolita sufrieron una expansión mucho menor que el espécimen de control al estar expuestos a sulfatos. Además, se puede observar en la figura 3 que estos no tuvieron cambios en su superficie.

Akbar *et al.* (2013) realizaron una investigación para crear un concreto con zeolita auto-compactable y de alta duración utilizando una baja proporción de cemento Portland. Se sustituyó cemento portland por zeolita desde 0% hasta 30%; además, se utilizó un agente reductor de la cantidad de agua. Sobre los resultados de las pruebas, todos los especímenes con zeolita dieron resultados más altos que el espécimen de control después de los 90 días. En resistencia a la penetración de cloruros todos los especímenes con zeolita dieron mejores resultados, y en las pruebas de resistividad se mostró también un buen desempeño.

Concluyendo con lo siguiente: Las mezclas con NZ niveles de reemplazo de 10-25% satisfizo la capacidad de flujo, la habilidad de pasar y los criterios de estabilidad de EFNARC (2002). La zeolita aumenta la resistencia a la compresión en edades mayores a 90 días, y, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de resistividad eléctrica, se concluyó que la incorporación de NZ podría mejorar la durabilidad en rendimiento de las mezclas de SCC (concretos auto-compactables).

Akkurt *et al.* (2010) realizó pruebas a especímenes de concreto con zeolita para ver si esta servía con propósitos de protección del espécimen a la radiación (evaluando las pruebas necesarias). Después del análisis se llegó a la conclusión que la zeolita no es viable como una alternativa para proteger al concreto de la radiación.

Miranda *et al.* (2014) ejecutó una sustitución parcial de cemento por zeolita variando los porcentajes desde 0% hasta 30%. Utilizó una relación de agua-cemento de 0.85 y el diseño del concreto fue para una resistencia de 200 kg/cm<sup>2</sup>. La zeolita utilizada quedó clasificada como una zeolita Clinoptilolite proveniente de un banco de Hermosillo, Sonora. Las características de los agregados utilizados se muestran en la tabla II.13.

Tabla II.14.- Características de agregados.

Agregado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	MVSS (kg/m <sup>3</sup> )	MVSC (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción de agua (%)	Humedad natural %	M.F.
Arena	2588	1491	1584	1.52	0.5	
grava	2339	1512	1619	2.04	1	2.95

Fuente: Miranda *et al.* (2014)

Al realizar las mezclas hicieron pruebas de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días para evaluar y comparar el comportamiento de los especímenes con zeolita contra el espécimen de control. Los resultados se muestran en la tabla II.14.

Tabla II.15.- Resultados de resistencia a la compresión.

Zeolita (%)	w/c	Resistencia compresión (Días) (MPA)	
		7	28
0	0.85	11.08	15.79
5	0.85	9.41	16.38
10	0.85	9.32	15.69
15	0.85	7.65	15.2
20	0.85	6.47	13.14
25	0.85	5.3	11.47

Fuente: Miranda *et al.* (2014)

Con estos resultados se observa que la resistencia a la compresión de los especímenes con zeolita disminuye a los 7 días de curado. Sin embargo, en el espécimen con 5% de zeolita, la resistencia a la compresión aumentó un poco. Con esto se llegó a la conclusión de que la sustitución parcial es factible en el rango de 5% al 15% debido a que en este rango la resistencia no disminuye demasiado y, en un caso en específico, incluso aumentó. Esto también esclareció que en los especímenes con zeolita es necesario utilizar una mayor cantidad de agua.

Por último, Vejmelková *et al.* (2014) también realizó una sustitución parcial del cemento por zeolita utilizando porcentajes desde 0% hasta el 30%, para la mezcla utilizó cemento Portland, cemento CEM I 42.5 y una zeolita Clinoptilolite proveniente de Nizny Hrabovec (Slovakia) en la mezcla. Además, utilizó aditivos plastificantes e inclusores de aire, y una relación de agua-cemento de 0.38. La composición química de la zeolita utilizada se muestra en la tabla II.15.

Tabla II.16.- Composición química de zeolita.

Propiedades	Zeolita %
CaO	3.24
SiO <sub>2</sub>	67.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4
MgO	0.75
Na <sub>2</sub> O	0.43
K <sub>2</sub> O	3.28
SO <sub>3</sub>	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-

Fuente: Vejmelková *et al.* (2014)

Con las características anteriormente mencionadas, Vejmelková *et al.* (2014) prosiguieron a realizar pruebas de resistencia a la compresión y flexión, así como también compararon los resultados con la viga de control. En la tabla II.16 se muestran los resultados.

Tabla II.17.- Resistencia a la compresión y flexión de los especímenes.

Zeolita (%)	w/c	Aditivo	Resistencia compresión (Días) (MPA)			resistencia flexión (MPa)
			7	28	90	28 Días
0	0.38	E.A.	57.6	62.4	63.8	8.1
7.5	0.38	E.A.	47.3	53.1	66	7.5
15	0.38	E.A.	44.8	51.5	58.5	6
22.5	0.38	E.A.	36.4	48.5	55.2	6.7
30	0.38	E.A.	26.7	41.8	52.3	6.2

\*E.A. = Inclusor de aire

Fuente: Vejmelková *et al.* (2014)

En los resultados mostrados en la tabla 16 se muestra que, con un porcentaje de 7.5% de zeolita, se obtuvo mejor resultado. Sin embargo, la resistencia a la compresión y flexión fue menor al espécimen de control en todas las etapas (con la excepción de los 90 días) se con esto concluyó que la zeolita probada exhibió una influencia negativa en la resistencia a los 28 días del concreto, pero causó una significativa mejora de las propiedades mecánicas en el plazo de 90 días.

La zeolita también aumentó la porosidad, lo que influyó en las propiedades de transporte de agua y las propiedades térmicas del concreto.

## CAPÍTULO III . – METODOLOGÍA

### Diagrama de metodología

Los pasos a seguir en la metodología son los que se muestran en la figura III.1.

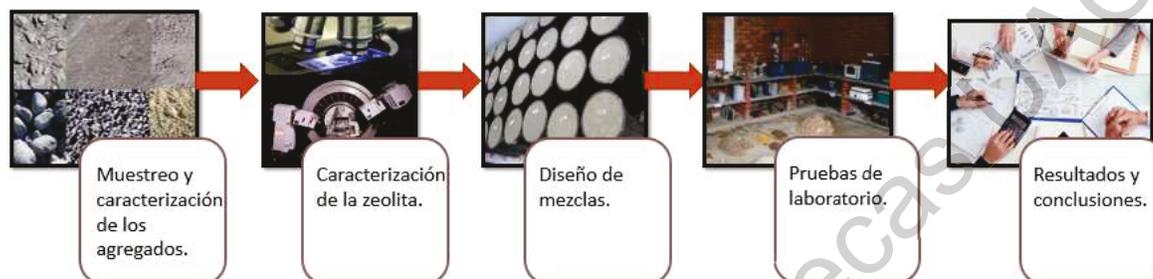


Figura III-1. – Desarrollo de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.- Paso 1: Selección y caracterización del agregado pétreo.

Gutiérrez (2003) menciona que los agregados constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad y estabilidad en las obras civiles, pues ocupan un volumen muy importante. Por ejemplo, el volumen de los agregados en el concreto hidráulico es de un 65% a 85%; en el concreto asfáltico es del 92% al 96%, y en los pavimentos del 75% al 90%. Debido a esto, el estudio de sus propiedades físicas y mecánicas son de suma importancia para su adecuada y eficiente utilización.

Los materiales a utilizar como agregados deberán cumplir con lo especificado en la norma N-CMT-2-02-/02 emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, donde especifica todas las pruebas que son necesarias realizar y de qué manera pueden ser obtenidos.

La metodología realizada se basa en la normativa. Primero, se realiza la caracterización de los agregados, que consiste en obtener las propiedades físicas y mecánicas de los agregados para poder comprobar que cumple con los requerimientos mínimos para que puedan ser utilizados como agregados del concreto, ya que estos juegan un papel muy importante en cuanto a la durabilidad y resistencia del concreto; además, la absorción de agua

de los agregados es un parámetro clave para saber la cantidad de agua que se utilizará en la mezcla.

El siguiente paso consiste en la caracterización de la zeolita para poder ver sus propiedades, ya que con base a investigaciones la relación sílice/aluminio en el rango de 5-15% las hace especialmente reactivas.

Luego, sigue el diseño de las mezclas de concreto que se van a utilizar, en las cuales se variará el porcentaje de zeolita que se va a utilizar.

Y el paso restante es evaluar el comportamiento de los especímenes con porcentajes de zeolita comparándolos con un espécimen de control (0% de zeolita).

El procedimiento que se sigue en las pruebas se basa en las normas nacionales, tales como: el Organismo Nacional de Normalización, la Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (NMX-C-ONNCE) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); y en normas Internacionales: American Society for Testing and Materials (ASTM), American Concrete Institute (ACI) y Portland Cement Association (PCA).

### **3.1.1.- Muestreo (NMX-C170-ONNCE-1997)**

Consiste en homogenizar el material (agregado grueso y fino) proveniente del banco de materiales de Corporativo AG para que al momento de realizar las pruebas presentes las características de todos los elementos sean iguales. El procedimiento del muestreo se muestra a continuación.

El procedimiento de cuarteo es el siguiente:

- Se mezcló todo el material de la muestra hasta que se logró homogenizar. Esto se logró traspaleando de un lugar a otro las veces que resulte necesario (es muy importante que la superficie donde se realice este procedimiento se encuentre limpia y sea lisa).
- Una vez homogenizada la muestra, se formó un cono depositando el material con la pala para lograr un acomodo y una distribución uniforme (como se muestra en la figura III.2).

- Al cono ya formado se le introdujo la pala en la punta y se giró la pala para formar un cono truncado.
- El cono truncado se separó en cuatro partes, lo más proporcionalmente posible, partiendo el cono por la mitad vertical y horizontalmente.
- La muestra es el material que se juntó de dos cuadrantes opuestos. Al momento de levantar este material es necesario tener cuidado para no perder nada de este.



*Figura III-2. - Cuarteo del material.*

Fuente: Propia.

### **3.1.2.- Granulometría del agregado grueso y fino (ASTM C 136 – 01)**

Esta prueba tiene el objetivo de dar a conocer la distribución de las partículas, ya sea de agregado grueso o fino. El tamaño máximo del agregado (TMA) en las gravas afecta a la cantidad requerida de agua y cemento, la trabajabilidad, economía y durabilidad del concreto. Cuando se tienen agregados muy gruesos puede ocurrir que las mezclas sean rígidas; mientras que los agregados que no poseen gran deficiencia o exceso de tamaño y tienen una curva

granulométrica suave tienen resultados más exitosos en las propiedades del concreto fresco (Kosmatka y Panarese 1992).

Por otro lado, la granulometría y el tamaño en los agregados finos influye en la trabajabilidad, cohesión en la mezcla y puede contribuir a que existan agrietamientos por contracción de secado. Con la granulometría también se obtiene un parámetro clave el módulo de finura, la cual es una característica que sirve para clasificar si la arena es buena (Uribe 1991).

Procedimiento para agregado grueso:

- Primero, es necesario saber el tamaño de muestra. Este se obtiene con el tamaño máximo del agregado, en este caso fue de 37.5mm, por lo cual la muestra debe ser de por lo menos 15 kg.
- Se secó el material para evitar que los finos se quedaran pegados en la grava.
- Después, se procedió a cribar el material por las mallas 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8" y malla #4, apuntando la cantidad retenida en cada una de las mallas para luego formar la curva granulométrica como se observa en la figura III.3 el tamizado por la malla 3/8".



Figura III-3.- Tamizado de la grava.

Fuente: Propia.

Procedimiento para agregado fino:

- Para el caso del agregado fino, se tomó una muestra de 500 gr para posteriormente realizar el cribado.
- Se secó el material a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ$ .
- Después se procedió a cribar el material por las mallas #4, malla #8, malla #16, malla #30, malla #50 y malla #100, apuntando la cantidad retenida en cada una de las mallas para posteriormente formar la curva granulométrica como se observa en la figura III.4 el tamizado por la malla # 50.



Figura III-4.-Tamizado de la arena.

Fuente: Propia.

### 3.1.3. - Límite Líquido (BS 1377: Part 2:1990).

El método de prueba del penetrómetro de cono para límite líquido se basa en la relación entre el contenido de humedad y la penetración de un cono en una muestra de suelo. Las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm<sup>2</sup>); este se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico.

Este método ocasiona que los resultados no estén afectados por las habilidades del operador y proporciona una medición visual de la penetración.

Para analizar los límites de la arena a estudiar se utilizó el penetrómetro de cono debido a que en arenas poco plásticas se recomienda utilizar este método. En esta prueba, el límite líquido del suelo es el contenido de humedad a la que un cono de 60 gramos de peso con un ángulo de punta de 60° se sumerge exactamente a 20 mm en una taza de suelos remoldeados en un período de 5 segundos.

Procedimiento:

- Se tomó una muestra de 500 gr del material que pasa la malla#40.
- El material fue puesto en un molde, se agregó agua para que lo cubriera completamente y se dejó saturando durante 24 hrs.
- Se retiró el agua, teniendo cuidado de no perder material al momento de vaciarla.
- El material se secó esparciéndolo y moviéndolo con una espátula para que lograra perder humedad.
- Mientras se realizó el paso anterior, se fueron tomando muestras y se metieron en la capsula del cono. Teniendo cuidado de que al momento de rellenarlas con el cuchillo no quedaran espacios vacíos, tal como se observa en la figura III.5.
- Se ensayaron en el cono inglés tomando las lecturas para cada una de las muestras para, posteriormente, tomar una muestra del centro de la muestra ensayada de al menos 20 gr y se metió al horno para obtener la humedad de ese punto.



Figura III-5.- Prueba limite líquido cono inglés.

Fuente: Propia.

#### 3.1.4. - Límite plástico (M.MMP-1-07/07).

Esta prueba consistió en labrar manualmente pequeños cilindros de suelo de 3mm de diámetro haciendo llegar a estos mismos a la frontera entre el líquido y el estado plástico y determinando la humedad del suelo cuando este empieza a agrietarse.

Procedimiento:

- Con el material utilizado para la determinación del límite líquido se tomaron aproximadamente 20 gr del mismo.
- Se extendió sobre una superficie limpia y se esperó a que este perdiera humedad, a tal punto de que este pudiera ser manipulado con las manos y tuviera la consistencia suficiente para poder formar una esfera.
- Se hizo rodar con la mano sobre una superficie limpia y plana, intentando formar rollitos de 3.2 mm de diámetro con la palma de la mano; pero como el material era una arena sin plasticidad nunca se pudieron formar los rollitos por los cuales en este caso se considera que no presenta un límite plástico.

### 3.1.5. - Contracción lineal

La contracción lineal (C.L.) se define como el porcentaje de contracción con respecto a la dimensión original que sufre una barra de suelo de 2cm x 2cm x 10cm al secarse en un horno a 100-110°C, desde una humedad equivalente a la humedad del límite líquido hasta el límite de contracción.

Procedimiento:

- Se tomó el material con el cual se obtuvo el valor más cercano al límite líquido.
- Se pesó el recipiente.
- Se midieron los moldes de contracción lineal con un vernier y después se engrasaron.
- Los moldes se llenaron con la muestra en capas, evitando que quedara aire atrapado.
- Se pesó el recipiente como se muestra en la figura III.6.
- Después se pusieron a secar al aire libre, cubriéndolos con una franela húmeda durante los próximos dos días y un solo día sin la franela. Al cuarto día fueron secados al horno durante un periodo de 16 horas.
- Se extrajo la muestra del horno y se midió su longitud final.



Figura III-6 Contracción lineal.

Fuente: Propia.

### 3.1.6. - Equivalente de arena (ASTM D 2419 – 02)

Este método de prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillas presentes a materiales pétreos. Este método de prueba está destinado a servir como una prueba de correlación de campo rápida. El propósito de este método de prueba es indicar, en condiciones estándar, las proporciones relativas de partículas finas o plásticas y el polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan por el tamiz de 4,75 mm (n. ° 4). El término "equivalente de arena" expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, arena y polvo de arcilla o plástico generalmente indeseables.

Procedimiento:

- Obtuvo 1.5 kg de material que pasa la malla #4. Se realizó un cuarteo de este material para obtener una muestra de 110 gr de material en la capsula del kit el material no se encontraba seco con el fin de que no se perdieran los finos durante el cribado.
- Después, con la solución de trabajo, se llenó una de las probetas hasta las 4" conservado que la solución estuviera a una altura de 91.8 cms de la probeta.
- Se vació el material de la capsula en la solución, esto dando golpes en la base para eliminar burbujas y para acelerar la saturación del material.
- Se dejó reposar el material en la solución durante 10 minutos.
- Se tapó la probeta con el tapón de hule y se procedió a agitar vigorosamente durante 90 ciclos en un periodo de 30 segundos.
- Se removió el tapón y se insertó el tubo irrigador con el cual se limpiaron las paredes de arriba hasta el fondo; se giró el cilindro conforme avanzaba el tubo irrigador para proporcionar la separación del material arcilloso y arenoso. El tubo irrigador se retiró al momento de llegar al nivel de las 15".
- Se dejó reposar durante 20 minutos para que la arena se sedimentara y los finos entraran en suspensión, como se observa en la figura III.7.

- Se tomó la lectura de los finos visualmente, la lectura de las arenas se toma introduciendo la vara hasta chochar con el nivel de las arenas.



Figura III-7. - Prueba equivalente de arenas.

Fuente: Propia.

### 3.1.7. - Densidad relativa y absorción de agua del agregado fino (NMX-C-165-ONNCCE-2014)

El objetivo de este ensayo es la determinación de la densidad relativa aparente y la absorción del agregado fino en la condición saturada y superficialmente seca.

En la sección 1 del manual de La Comisión Federal de Electricidad (1994), se especifica que la absorción en el agregado fino no debe ser mayor al 5%.

Procedimiento:

- Se puso material a saturar durante 24 horas
- Se decantó el exceso de agua teniendo cuidado de no perder finos.

- Se extendió el suelo afuera hasta alcanzar la condición de saturado superficialmente seco.
- Se continuó secando el material hasta que al momento de compactar la muestra en el molde del tronco cono con 25 golpes se logró la forma que se muestra en la figura III.8.

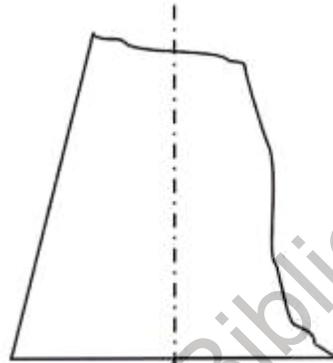


Figura III-8.- Muestra después de retirar el molde.

Fuente: NMX-C-165-ONNCCE-2014.

- Se pesó un picnómetro hasta el nivel de aforo.
- Se retiró el agua hasta un nivel bajo y se agregaron 100 gr de la muestra en la condición de saturado superficialmente seco. Se llenó al nivel de aforo de nuevo y se pesó.
- De la misma muestra saturada superficialmente seca se tomó una muestra de por 200gr, la cual después se introdujo al horno durante 24 hrs para posteriormente pesarse para conocer la masa de la muestra seca como se observa en la figura III.10.



Figura III-9.- Compactación en molde.

Fuente: Propia.



Figura III-10.- Prueba densidad del agregado fino.

Fuente: Propia.

### **3.1.8. - Densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso (NMX-C-165-ONNCCE-2014)**

La absorción de la grava es la capacidad que tiene de absorber agua hasta que todas sus partículas queden sobresaturadas. No se recomiendan las absorciones mayores al 3% con tolerancia de hasta 3.3% en la grava. El exceso de absorción en la grava puede deberse a una condición natural de las rocas que lo constituyen o puede ser provocado por la presencia de partículas de inferior calidad o de materia contaminante (CFE, 1994).

Procedimiento:

- Se cribó y lavó el material por la malla #4.
- Se puso a secar el material durante 24 horas.
- Teniendo el material ya secado y cribado, se sumergió en agua durante 24 horas.
- Después de tener el material ya saturado se buscó llegar a la condición de superficialmente seco, que se logró secando con una franela hasta eliminar el agua superficial, como se observa en la figura III.11.
- Se pesó la muestra superficialmente seca y después con la ayuda de la canastilla se sacó su masa sumergida.
- Después se tomó la muestra y se metió al horno durante 24 horas para tener el peso seco de la muestra.



Figura III-11.- Prueba densidad del agregado fino.

Fuente: Propia.

### 3.1.9. - Desgaste por abrasión (prueba de Los Ángeles) (NMX-C-196-ONNCCE-2010)

Determinar la resistencia al desgaste de materiales pétreos mediante el impacto y abrasión que produce un número especificado de esferas de acero sobre una muestra de material con características granulométricas específicas, contenidas en un tambor giratorio metálico.

La prueba de abrasión en la máquina de desgaste (máquina de Los Ángeles) está limitada para materiales con masa volumétrica seca suelta mayor a  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ .

En los agregados gruesos esta es una de sus propiedades físicas más importantes debido a que nos permite saber el estado del agregado, la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto utilizado en una losa. El valor máximo permitido de desgaste por norma ASTM C 131(2006) es de 30%.

Procedimiento:

- Primero se clasificó el material como tipo A.
- Se lavó el material para eliminar los finos y posteriormente se secó en el horno durante 24 horas.

- Se pesó la muestra, la cual debe pesar 5000 gramos con tolerancia  $\pm 10$  gramos.
- Se metió el material en el equipo de abrasión que se muestra en la figura III.12 junto con 12 esferas.



Figura III-12.- Equipo de abrasión.

Fuente: Propia.

- Se sometió el material a 500 revoluciones como se muestra en la figura III.13.



Figura III-13.- Prueba desgaste los ángulos.

Fuente: Propia.

- Se retiró el material en una charola y se cribó por la malla no. 12.
- El material que paso la malla no. 12 se desechó y se lavó el retenido como se muestra en la figura III.14.



Figura III-14.- Lavado de material retenido en malla 12.

Fuente: Propia.

- Por último, se secó el material durante 24 horas y después se pesó.

### 3.1.10. - Módulo de finura (ASTM C 125)

El módulo de finura (FM) del agregado fino se obtiene sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura para las arenas son 0.15 mm (No.100), 0.30 mm (No.50), 0.60 mm (No.30), 1.18 mm (No.16), 2.36 mm (No.8), 4.75 mm (No.4) y 9.52 mm (3/8”). El módulo de finura es un índice de la finura del agregado; entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto. Según la normativa, tanto de ASTM y la mexicana, este deberá estar en el rango de 2.3 y 3.1

Cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa) puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables; faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad. La otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina); en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe 1991).

### 3.1.11. - Peso volumétrico suelto de la arena y grava

El peso volumétrico es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en Kg/m<sup>3</sup>, hay dos valores para esta relación: el peso volumétrico suelto y peso volumétrico compactado. En el caso del peso volumétrico suelto, este se utiliza para la conversión de peso a volumen y también es uno de los valores utilizados para realizar el diseño de mezclas de concreto.

El peso volumétrico suelto se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$P.V.S.S = \frac{W_m}{V_r}$$

Donde:

P.V.S.S= Peso Volumétrico Seco Suelto

W<sub>m</sub>= Peso del material (kilogramos)

V<sub>r</sub>=Volumen recipiente (m<sup>3</sup>)



Figura III-15.- Prueba peso volumétrico seco suelto.

Fuente: Propia.

Procedimiento:

- Se obtuvo una muestra representativa por medio de cuarteos.
- Se procedió a secar esta muestra obtenida anteriormente.
- Se tomó un recipiente con un volumen conocido (se utilizaron diferentes moldes para la arena y grava).
- Se pesó el recipiente como se observa en la figura III.15.
- Se procedió a dejar caer material en el recipiente con un cucharón a una altura de caída de aproximadamente 5 centímetros hasta tener el recipiente lleno.
- Se enrasó utilizando la regla.
- Se pesó el recipiente con material.

### 3.1.11. - Peso volumétrico compacto de la arena y grava (ASTM C 29)

El peso volumétrico es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo y es expresado en Kg/m<sup>3</sup>. Hay dos valores para esta relación: el peso volumétrico suelto y peso volumétrico compactado. En el caso del peso volumétrico compacto, este se utiliza para el conocimiento de volumen de materiales aplicados y que están sujetos a acomodamientos o asentamientos provocados por el tránsito o por la acción de tiempo; también es un valor que se utiliza en el diseño de mezclas de concreto.

El peso volumétrico compacto se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$P.V.S.C = \frac{W_m}{V_r}$$

Donde:

P.V.S.C= Peso Volumétrico Seco Compacto

W<sub>m</sub>= Peso del material (kilogramos)

V<sub>r</sub>=Volumen recipiente (m<sup>3</sup>)

Procedimiento:

- Se obtuvo una muestra representativa por medio de cuarteos.
- Se secó la muestra representativa tomada.
- Se tomó un recipiente con un volumen conocido (se utilizaron diferentes moldes para la arena y grava).
- Se pesó el recipiente.
- Se llenó en molde en tres capas, las cuales fueron compactadas dándoles 25 golpes a cada una.
- Se enrasó el recipiente utilizando la regla.
- Se pesó el recipiente con material.

### 3.2.- Pasó 2: Caracterización zeolita

La caracterización de la zeolita es importante debido a que con esta puedes hacer comparación con las zeolitas utilizadas por diferentes investigadores y observar las diferencias que presentan y relacionar estas diferencias a los diferentes resultados que se han obtenido por distintos investigadores los cuales no todos concuerdan con el hecho de que adicionar zeolita aumenta la resistencia del concreto.

La zeolita utilizada en este estudio es proveniente de una mina de zeolita en Puebla con el nombre de Grupo TCDN, S.A. DE C.V.

#### 3.2.1. - Difracción de Rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X (DRX) se utilizó para identificar el grado de cristalinidad, así como la composición mineral de la zeolita. La técnica se basa en que una gran parte de los sólidos están compuestos por sustancias cristalinas, las cuales presentan redes tridimensionales debido al arreglo de sus átomos que al solidificarse actúan como rejillas de difracción para rayos incidentes monocromáticos; siempre que la longitud de onda incidente sea del orden de la distancia entre átomos. Por tanto, para que ocurra el fenómeno de difracción, la longitud de onda del haz incidente debe ser del orden de la distancia entre átomos. En las mismas condiciones cada sustancia cristalina, que presenta orden de largo alcance, produce un difractograma único que puede ser empleado para su identificación (Zhao y col., 2012). Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro Miniflex de la marca Rigaku, utilizando un rango de  $5-80^\circ$  en  $2\theta$ .

Procedimiento:

- Primero se colocó, con la ayuda de pinzas, la muestra de zeolita y cemento en un porta muestras como se muestra en la figura III.16.



Figura III-16.- Colocación de cemento en porta muestras.

Fuente: Propia.

- Después de colocar con la ayuda la muestra en el porta muestras se compacta con la ayuda de un vidrio.
- Después se pusieron las diferentes muestras en el difractor de marca Rigaku Mini Flex como se muestra en la figura III.17.



Figura III-17.- Muestras en el difractor.

Fuente: Propia.

- Se realizó el análisis difractograma utilizando un rango de 5-80° en 2 $\theta$ .

### 3.2.2. - Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La composición química de la zeolita se determinó en un equipo de fluorescencia de rayos X de la marca Bruker S2 Picofox. La fluorescencia de rayos X es una técnica en la cual la radiación emitida por la muestra se hace incidir sobre un cristal de análisis, donde el espaciado  $d$  es conocido y su posición es variable. En función de  $d$  y  $2\theta$  se refleja una única longitud de onda ( $\lambda$ ) y a través de ella es posible conocer el elemento al que pertenece (Márquez y col., 2014).

### 3.2.3.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Para observar la morfología de las zeolitas se utilizará un microscopio Hitachi TM-1000. Con la técnica de microscopia electrónica de barrido se obtienen imágenes de gran resolución de los caracteres superficiales de los objetos. Este interacciona un haz primario de electrones sobre el área del objeto de estudio y de este modo se visualizan las imágenes (Saracho y col., 2015).

Procedimiento:

- Se colocó cuidadosamente en la cinta adhesivas cemento y zeolita como se muestra en la figura III.18.



Figura III-18.- Muestra colocada en cinta adhesiva.

Fuente: Propia.

- Después de colocar las muestras en las cintas correspondientes se ensamblan en el molde que se introdujo en el microscopio como se observa en la figura.III,19.



Figura III-19.- Muestras de cemento y zeolita en molde correspondiente de microscopio.

Fuente: Propia.

- Por último, se realiza el análisis con la ayuda de una computadora que cuenta con una palanca de mando (para desplazarse por la muestra). Además de ir variando los incrementos de aumento para ir tomando fotografías diferentes escalas.

### 3.3.- Paso 3: Diseño de mezclas

Un concreto hidráulico es formado por agregados materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado; o por materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente, que al mezclarse con cemento Portland y agua forman concreto hidráulico.

Diseñar una mezcla de concreto es determinar una combinación que tome en cuenta el aspecto económico y práctico con el objetivo de producir una mezcla con la manejabilidad, resistencia y durabilidad requeridas.

Para encontrar las proporciones óptimas es necesario preparar varias mezclas de prueba, las cuales se calcularán con base a las propiedades de los materiales y la aplicación de las leyes o los principios básicos preestablecidos.

Para el diseño de la mezcla de concreto existe el Método ACI, el cual consiste en nueve pasos.

Procedimiento:

- El primer paso realizado en el diseño de mezclas fue la selección del revenimiento, el cual se hizo tomando en cuenta la tabla III.1, del cual se tomó el valor de 8.

*Tabla III.1.- Revenimiento recomendado dependiendo del tipo de construcción.*

Tipo de construcción	Revenimiento, en c	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas.	8	2
Zapatas, campanas y muros de subestructura sencillos.	8	2
Vigas y muros reforzados.	10	2
Columnas para edificios.	10	2
Pavimentos y losas.	8	2
Concreto masivo.	5	2

Fuente: ACI 211.1

- El siguiente paso es definir el tamaño máximo del agregado el cual fue de 1 ½” obtenido de la granulometría del suelo.
- El siguiente paso fue obtener la cantidad de agua requerida por m<sup>3</sup>, el cual se obtuvo con la tabla III.2; entrando con los valores de tamaño máximo de agregado con la condición de si el concreto es con o sin aire incluido y con el revenimiento deseado.

Tabla III.2.- Cantidad de agua necesaria por m<sup>3</sup> para concretos sin aire incluido.

Revenimiento (cm)	Agua kg/m <sup>3</sup> de concreto para los tamaños máximos de agregado(mm).							
	9.53	12.70	19.05	25.40	38.10	50.80	76.20	152.40
3 a 5	208	199	187	178	164	155	131	113
8 a 10	229	217	202	193	178	170	146	125
15 a 18	145	137	125	122	110	107	101	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concretos sin inclusión de aire	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: ACI 211.1

- El siguiente paso fue seleccionar la relación agua cemento, que se selecciona con la tabla III.3, utilizando la resistencia a la compresión deseada y si el concreto es sin o con aire incluido.

Tabla III.3.- Relación agua-cemento con base a esfuerzo a la compresión y el tipo de concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua-cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
422	0.41	-
352	0.48	0.40
211	0.57	0.48
141	0.68	0.59
0	0.82	0.74

Fuente: ACI 211.1

- El siguiente paso fue calcular la cantidad de cemento necesaria con la siguiente fórmula.

$$C = \frac{A}{A/C}$$

C= Cantidad de cemento por m<sup>3</sup>.

A/C= Relación agua cemento.

A= Cantidad de agua por m<sup>3</sup>.

- El siguiente paso fue la estimación de la cantidad de agregado grueso que se hizo con la ayuda de la tabla III.4, en la cual se entra con el módulo de finura de la arena y el tamaño máximo nominal de agregado.

*Tabla III.4.- Volumen de agregado grueso.*

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso* varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
		2.4	2.6	2.8	3.0
9.53mm	3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
12.7mm	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19.05mm	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
25.4mm	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1mm	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8mm	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
76.2mm	3"	0.82	0.8	0.78	0.76
152mm	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1

- El volumen de agregado fino se estimó por medio del método de volumen absoluto, el cual está basado en la siguiente ecuación:

$$Volumen = \frac{Peso}{Gravedad\ específica * Peso\ volumétrico\ del\ agua}$$

- El último paso fue el ajuste de humedad del agregado, que se realiza con la siguiente ecuación:

*Agua a añadir*

$$= \text{Agua neta de mezclado} - W_{\text{arena seca}}(u_{\text{arena}} - Abs_{\text{arena}}) \\ - W_{\text{grava seca}}(u_{\text{grava}} - Abs_{\text{grava}})$$

Donde:

W= Peso (kg)

u= Contenido de agua

Abs= Absorción

### **3.4.- Paso 4: Pruebas al concreto.**

#### **3.4.1.- Ensayo de compresión simple (NMX-C-083-ONNCCE-2014)**

El objetivo de este método es la determinación del esfuerzo de compresión en especímenes cilíndricos, sean estos moldeados o núcleos obtenidos por extracción. Esta norma se limita a concretos que tengan un peso unitario en exceso de 800 kg/m<sup>3</sup> (50 lb/pie<sup>3</sup>).

El esfuerzo a la compresión del espécimen es calculado dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo por el área de la cara axial del espécimen. Los resultados a la compresión obtenidos pueden depender de la forma y el tamaño del espécimen, la pasta del cemento, los procedimientos de mezcla, los métodos de muestreo, fabricación, la edad y las condiciones de humedad durante el curado.

La resistencia mínima requerida, según Virginia Department of Transportation and the University of Virginia (1998), es de 282 kg/cm<sup>3</sup> para concreto que se utilice como losa en un pavimento rígidos; sin embargo, en algunos países como Canadá se tiene establecido que el mínimo es de 306 kg/cm<sup>3</sup>.

Procedimiento:

- Primero se tomaron las dimensiones del cilindro mediante vernier electrónico y después se pesaron.
- Se puso a derretir el azufre y después se vertió en el molde de cabeceo.
- Se cabeceó el cilindro como se muestra en la figura.III.20.



Figura III-20.- Cabeceo de cilindro.

Fuente: Propia.

- Se procedió a colocar el cilindro en la prensa y se le aplicó una carga controlada, como se muestra en la figura III.21. Hasta el fallo la carga máxima soportada se registró.



Figura III-21.- Aplicación de carga a cilindro de concreto.

Fuente: Propia.

- Se retiró el cilindro de la prensa y después se identificó el tipo de falla que tuvo, el cilindro ya ensayado se muestra en la figura III.22 que se muestra una falla tipo 3 de fracturas verticales de columna de extremo a extremo, con conos no formados.



Figura III-22.- Cilindro de concreto ensayado.

Fuente: Propia.

#### **3.4.2.- Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón (NMX-C-191-ONNCCE-2015)**

En esta norma se ocupa de ensayos de flexión del hormigón que se usa en la construcción de bloques y pavimentos con un aparato de flexión de tipo "viga simple con cargas concentradas en los tercios". Para realizar el ensayo, la probeta tiene forma de viga de 6 x 6 pulgadas con una longitud mínima de 21 pulgadas. Se utilizan las velocidades de carga, la orientación adecuada de las probetas y la aplicación de precarga para asegurar un contacto "sin espacios" entre la probeta y el útil de ensayo especificadas en la forma. El resultado que se espera es que el módulo de rotura se calcule y que la probeta falle dentro del tercio medio de la longitud de separación en el área de tracción o la parte inferior de la probeta.

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello; por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión.

Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm<sup>2</sup> (583 psi) hasta los 50 kg/cm<sup>2</sup> (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener (Manual de pavimentos, CEMEX).

Procedimiento:

- Se pesó y midió el espécimen.
- Se marcó el espécimen a los tercios.
- Se colocó el espécimen en la prensa (la cara que se que coloca en contacto con los apoyos no era la del enrasado) para aplicarle una carga controlada como se muestra en la figura III.23.



Figura III-23.- Ensayo a flexión de vigas.

Fuente: Propia.

- Se le aplicó carga hasta que la viga falló y se registró la carga máxima soportada. En la figura III.24 se muestra cómo quedó la viga después del ensayo, también se puede observar en esta imagen que la falla se identifica como falla dentro del tercio medio por lo cual este resultado se considera satisfactorio



Figura III-24.- Ensayo a flexión de vigas.

Fuente: Propia.

### 3.4.3.- Prueba revenimiento al concreto fresco (NMX-C-156-ONNCCE-2010)

El objetivo de este método es proporcionar información rápida sobre la trabajabilidad del concreto. Esta trabajabilidad o plasticidad del concreto es un dato importante porque un concreto con un revenimiento bajo tiene poca fluidez, y esto puede provocar que queden atrapadas burbujas de aire durante el proceso de colado, dejar un acabado con oquedades en sus caras expuestas, afectar la apariencia, calidad y durabilidad del concreto; mientras que un concreto con revenimiento alto será demasiado fluido, de tal forma que al escurrirse por las uniones de la cimbra, puede perder rápidamente el agua y arrastrar con ella al cemento, así como puede resultar que se segreguen los agregados y se disminuya la resistencia a la compresión del concreto.

Procedimiento:

- Primero se humedeció el molde del revenimiento.
- Se vertió la mezcla en 3 capas cada una compactada con 25 golpes y en la última capa, después de la compactación, se enraso con la varilla.
- Se retiró el molde del revenimiento con una velocidad de 3 a 5 segundos para colocarlo invertido a lado del concreto compactado.
- Se colocó la varilla en la parte superior del molde y se midió el asentamiento que el concreto tuvo.

## CAPÍTULO IV . - RESULTADOS

### 4.1 Caracterización del agregado fino y grueso

#### Granulometría agregado fino:

La granulometría cumplió con la que establecía la norma mexicana en cuanto a granulometría para agregados finos que se van a utilizar en una mezcla de concreto, En la figura IV.1 se muestra la granulometría del material con los límites que establece la norma.

Tabla IV.1.- Granulometría de agregado fino.

Tamiz	Abertura(mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje parcial retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%) Retenido	Pasante
3/8"	9.5	0	0.000	0.000	100.000
#4	4.75	12.61	2.522	2.522	97.478
#8	2.36	60.50	12.100	14.622	85.378
#16	1.18	88.85	17.770	32.392	67.608
#30	0.6	102.00	20.400	52.792	47.208
#50	0.3	103.19	20.638	73.430	26.570
#100	0.15	87.50	17.500	90.930	9.070
#200	0.074	20.500	4.100	95.030	4.970
Peso total de muestra=		500.00			
Módulo de finura=		2.67			

Fuente: Elaboración Propia.

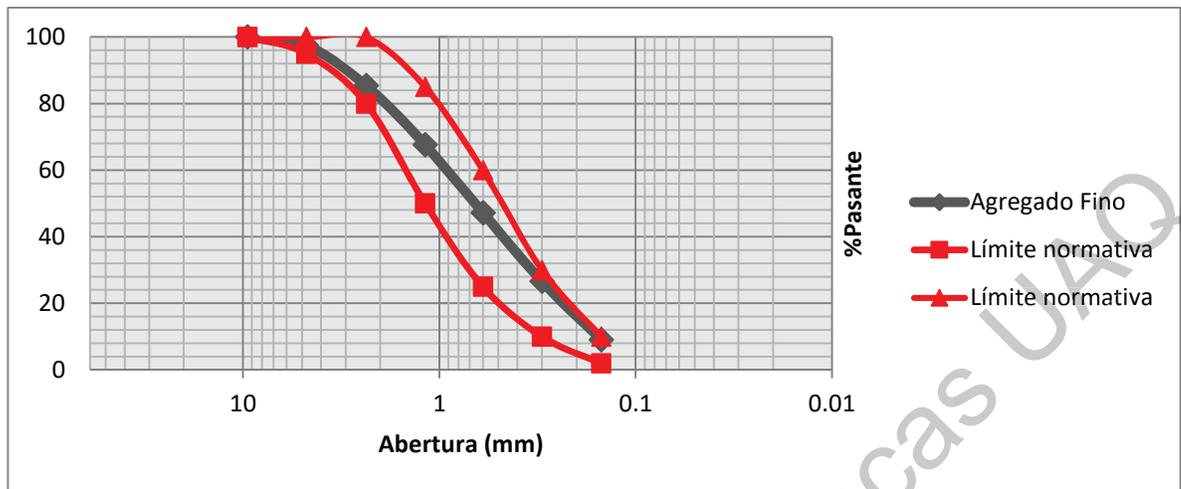


Figura IV-1.- Granulometría del agregado fino

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se llega a la conclusión de que el material cumple con el módulo de finura y granulometría que indica la norma mexicana.

#### Densidad y absorción del agregado grueso y fino:

En la tabla IV.2 se puede ver la absorción y densidad de la grava y arena. Como se puede observar, la absorción está dentro del rango permitido en ambos materiales.

Tabla IV.2.- Absorción y densidad de los agregados.

Material:	Densidad	Absorción (%)	Absorción máxima recomendada (%)
Arena	2.04	2.934	5
Grava	2.75	1.04	3

Fuente: Elaboración Propia.

#### Límites de consistencia del agregado fino:

En la tabla 3, se muestran los límites de consistencia que se obtuvieron de la arena y los valores máximos que permite la norma y, como se puede observar, todos los valores cumplieron.

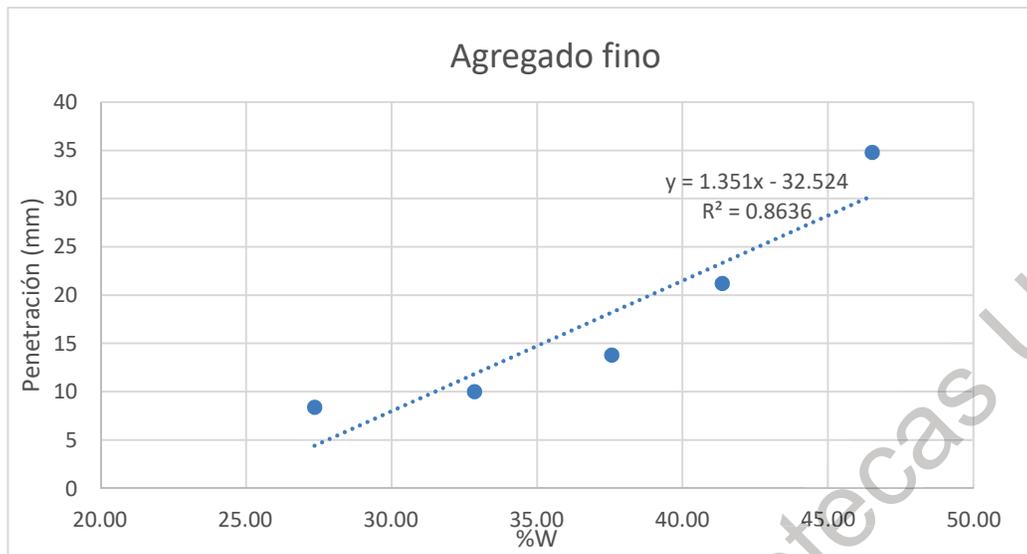


Figura IV-2.- Limite liquido obtenido por el método de cono inglés.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.3.- Límites de consistencia.

Material	L.L	L.P.	I.P.	C.L.	L.L. Max (Normativa)	I.P. Max (Normativa)	C.L Max. (Normativa)
Arena	38.90%	N.P.	N.P.	0.90%	40.00%	5.00%	2.00%

Fuente: Elaboración Propia.

### Equivalente de arenas:

Los resultados obtenidos del agregado fino de equivalente de arena fueron satisfactorios en cuanto a Rivera (S.F) y CEMEX. Los resultados se muestran en tabla IV.4.

Tabla IV.4.- Equivalente de arena obtenido.

Material	E.A. (%)	E.A. (%) Min. recomendado (*)	E.A. (%) Max. recomendado (**)
Arena	78.57	70	80

Fuente: Elaboración Propia.

### Peso volumétrico seco suelto y compacto de arena.

Los resultados de la prueba de pesos volumétricos se muestran en la tabla 5, estos valores son necesarios para poder realizar el diseño de la mezcla de concreto.

Tabla IV.5.- Pesos volumétricos.

Material	P.V.S.S (kg/m <sup>3</sup> )	P.V.S.C (kg/m <sup>3</sup> )
Arena	1174.9	1287.3

Fuente: Elaboración Propia.

### Granulometría del agregado grueso:

El agregado grueso sigue la siguiente granulometría que se muestran en la tabla 6 y en la figura IV.3 donde además se muestran los límites permitidos por la normativa mexicana.

Tabla IV.6.- Granulometría agregado grueso.

Tamiz	Abertura(mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje parcial retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
				Retenido	Pasante
2"	50	0	0.000	0.000	100.000
1 1/2"	37.5	374.6	1.843	1.843	98.157
1"	25	2955.6	14.538	16.381	83.619
3/4"	19	3856.4	18.969	35.350	64.650
1/2"	12.5	4849.2	23.852	59.202	40.798
3/8"	9.5	3086.6	15.182	74.385	25.615
No.4	4.75	4288.8	21.096	95.481	4.519
Peso total de muestra=		20330	Gr		

Fuente: Elaboración Propia.

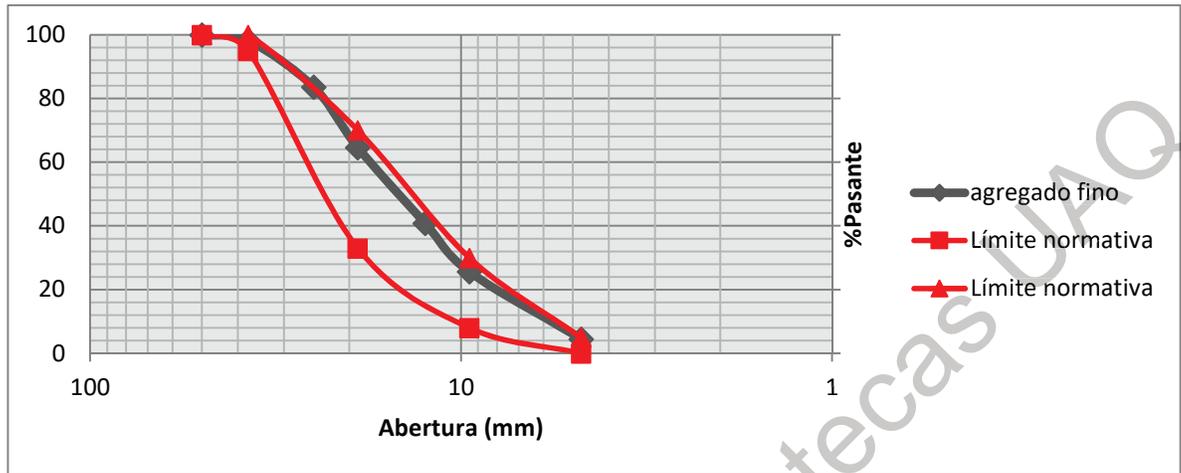


Figura IV-3.- Granulometría del agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia.

### Peso volumétrico seco suelto y compacto de grava

Los resultados de la prueba de pesos volumétricos se muestran en la tabla 7. Estos valores son necesarios para poder realizar el diseño de la mezcla de concreto.

Tabla IV.7.- Pesos volumétricos.

Material	P.V.S.S (kg/m <sup>3</sup> )	P.V.S.C (kg/m <sup>3</sup> )
Grava	1499.73	1674.46

Fuente: Elaboración Propia.

### Desgaste los ángeles

Con los resultados que se presentan en la tabla 8, se llega a la conclusión de que el agregado tiene una resistencia adecuada a la abrasión o trituración. En los agregados gruesos esta es una de las propiedades físicas más importantes debido a que nos permite saber el estado del agregado, la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto. El valor máximo permitido de desgaste por norma ASTM C 131(2006) es de 30%.

Tabla IV.8.- Desgaste los ángeles.

<b>Material</b>	<b>D.A (%)</b>	<b>D.A (%) máximo permitido</b>	<b>D.A. (%) Máximo ASTM</b>
Grava	10.67	50	30

Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2 Caracterización de la zeolita y cemento

### 4.2.1 Difracción de rayos X (DRX):

En esta sección se presentan los principales compuestos mineralógicos de los cuales se encuentran compuestos 2 de los principales materiales utilizados en las mezclas de concretos. En las gráficas se presentan en intensidades de Cuentas por segundo (CPS) sobre el eje de las ordenadas en función al ángulo de  $2\theta$  en el eje de las abscisas.

Como se sabe el cemento no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos minerales. Cuatro de ellos conforman el 90 % o más del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el alumino ferrito tetracálcico. Los diversos tipos de cemento contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes. Los silicatos de calcio constituyen cerca del 75% del peso del cemento. De acuerdo con el análisis de DRX realizado a la muestra de cemento, que se muestra en la figura IV.4, se concuerda con lo mencionando anteriormente; las principales fases cristalinas del cemento son el silicato de calcio y calcita, lo que representan aproximadamente el 75% del peso del cemento.

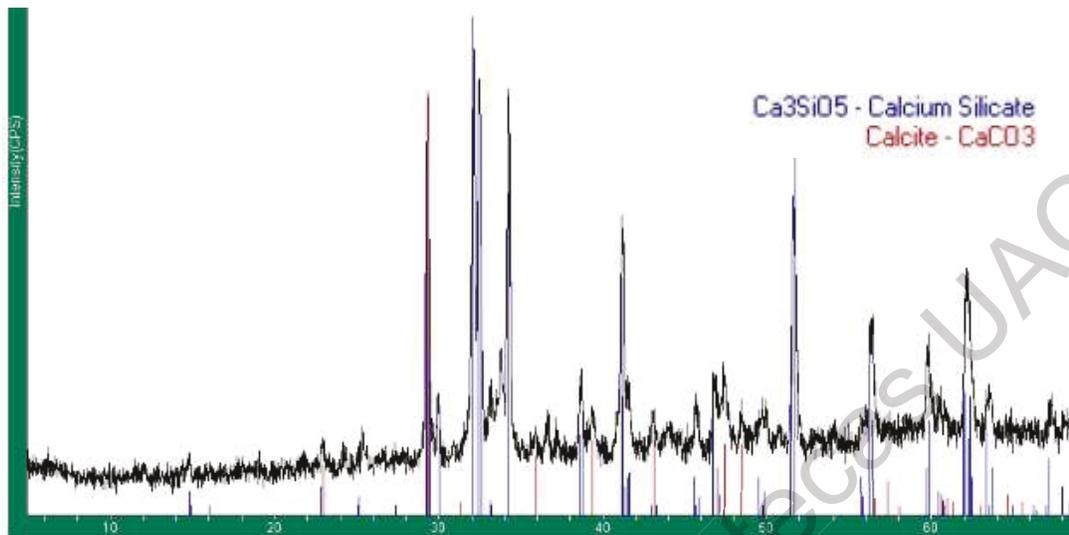


Figura IV-4.- Espectro de DRX del cemento.

En el otro caso la zeolita, muestra picos bien definidos en el rango de  $10^\circ$  a  $54^\circ$  en  $2\theta$  en el patrón de DRX como se muestra en la figura IV.5. Además, se puede observar que el principal componente mineralógico de la zeolita es la clinoptilolita, pero no es el único pues también existe un contenido considerable de albite.

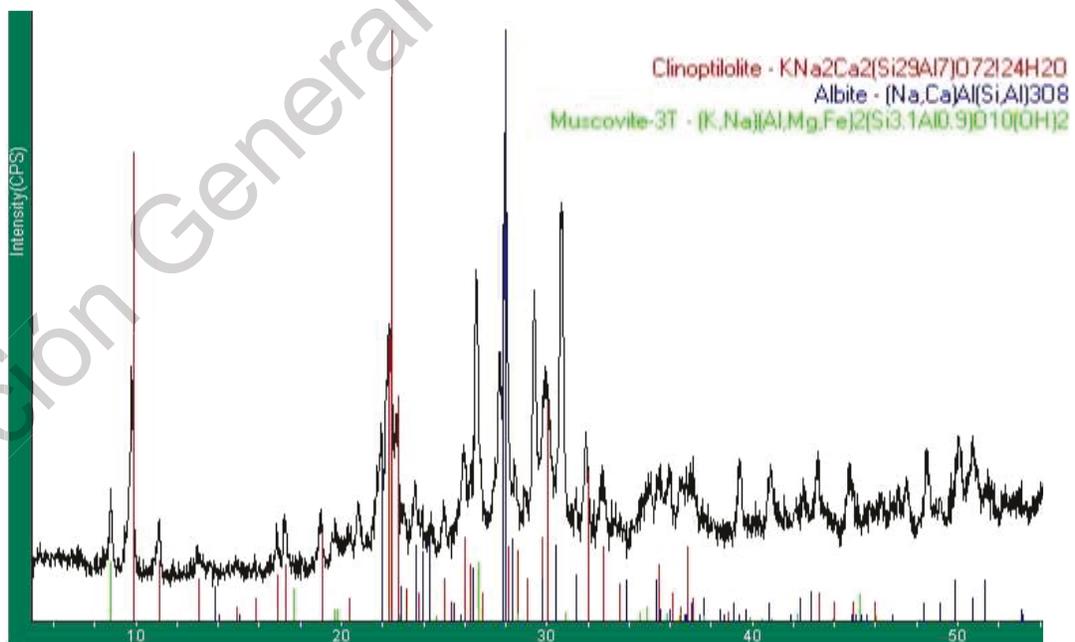


Figura IV-5.- Espectro de DRX de la zeolita.

#### 4.2.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Con la prueba de fluorescencia se pueden observar los compuestos con los cuales se encuentra constituida la zeolita. Como se puede observar en la tabla IV.9, los principales compuestos de la zeolita son el óxido de silicio y el óxido de aluminio, los cuales constituyen más del 80% de la composición de la zeolita.

Tabla IV.9.- Composición química de la zeolita.

Composición química	Zeolita natural (%)
SiO <sub>2</sub>	68.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.643
CaO	8.674
MgO	1.545
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.132
Na <sub>2</sub> O	0.225
K <sub>2</sub> O	4.345
P.H.	7.88
CEC (me/100g)	98.03

Fuente: Grupo TCDN S.A DE C.V

#### 4.2.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM):

Mediante esta técnica se logró observar la textura, tamaño y forma de la zeolita en polvo y del cemento Portland. En las figuras IV-6(a, b y c) se pueden observar las fibras de la zeolita, sus partículas de diferentes tamaños, las formas planas de partículas, su composición homogénea, las partículas pequeñas de forma circular, los aglomerados de partículas, las pequeñas láminas y sus diferentes morfologías.



a) Vista de zeolita a escala de 20 micras con aumento de 6.0k

Zeolita0003 2019/02/22 L D4.1 x4.0k 20 um  
CGEO, UNAM



b) Vista de zeolita a escala de 10 micras con aumento de 6.0k

Zeolita0004 2019/02/22 L D4.1 x6.0k 10 um  
CGEO, UNAM

Dirección General de Bibliotecas UAQ

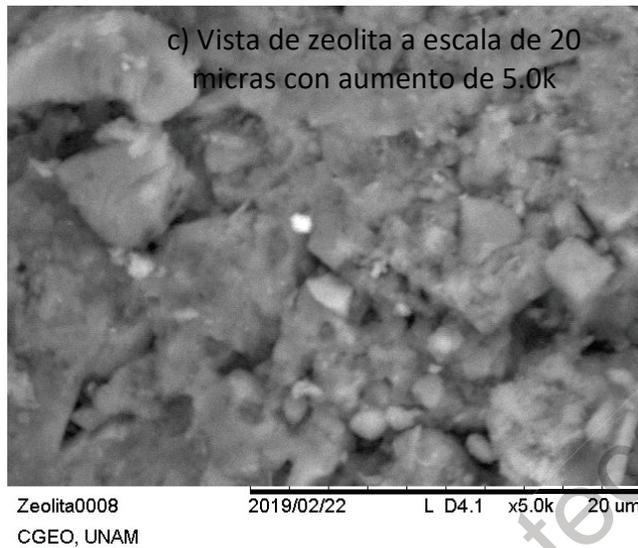


Figura IV-6.-Micrografías por SEM de la zeolita natural.

Fuente: Propia.

Las figuras IV-6(a, b y c) contienen variación de tamaños. Estas imágenes fueron tomadas en la escala de 20 micras, 10 micras y 20 micras, respectivamente, y se realizaron con aumentos de 4.0k, 6.0k y 5.0k, respectivamente.

Las figuras IV-7 (a y b) muestran en dos micrografías tomadas de distintos aumentos de cemento Portland, obtenidas por la técnica SEM.

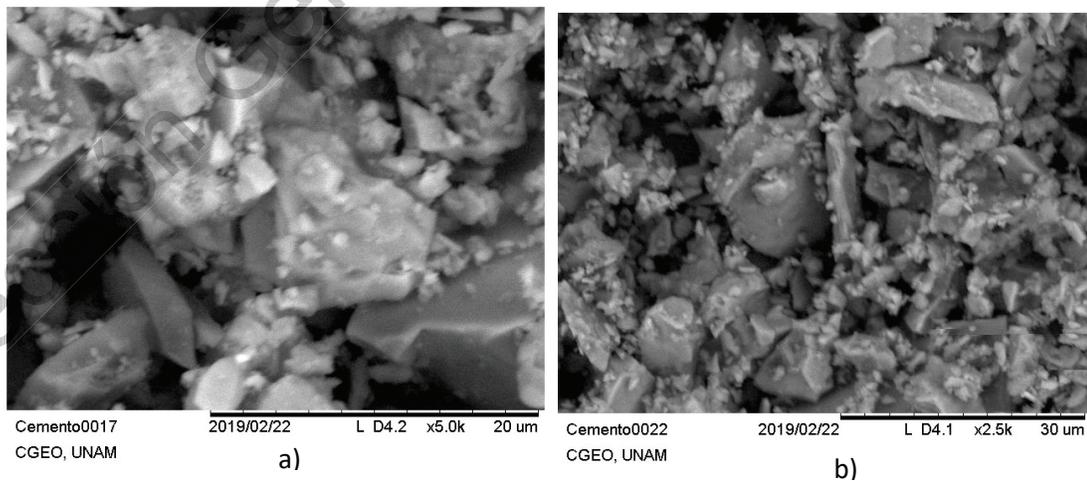


Figura IV-7.-Micrografías por SEM del cemento Portland.

Fuente: Propia.

En estas imágenes se puede observar que el tamaño las partículas que conforman al cemento son más pequeñas que las partículas de la zeolita y que contiene variación de tamaños. Estas imágenes fueron tomadas en la escala de 20 micras y 30 micras, y realizando aumentos de 5.0k y 2.5k, respectivamente.

#### 4.2.3 Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS):

Mediante esta técnica se determinó la composición elemental que se muestra en la tabla IV.10; por medio de un análisis semi-cuantitativo. Esta técnica te permite conocer las cantidades de elementos en un área o punto específico de la muestra, por lo cual, para tener valores más apegados a la realidad se realizó un promedio de 5 áreas. Es necesario mencionar que los resultados obtenidos difirieron de los valores que se obtuvieron en la fluorescencia de rayos X debido a que el análisis EDS no contempla óxidos y es, puramente, la composición elemental.

En la tabla IV.10 también se puede observar que el contenido de silicio es bajo, esto se puede deber a como se mencionó anteriormente que estos análisis se realizan en zonas muy pequeñas y se podría estar analizando una partícula de carbonato de calcio.

Tabla IV.10.- Composición elemental (EDS) de zeolita y cemento Portland.

Muestra	% Peso promedio					
	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Cemento Portland Cruz Azul	4.27	7.17	1.70	1.97	79.07	5.87
Zeolita	1.45	11.6	43.575	6.4	16.275	20.725

Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la tabla IV.10, los principales componentes de la zeolita son el sílice y aluminio, lo que concuerda con su definición en la cual se definen como sílice aluminosos.

Es importante conocer los contenidos de los elementos debido a que estos son los que generan la reacción puzolánica.

#### 4.2.4 Granulometría de zeolita

En la tabla IV.11 se muestra la granulometría de la zeolita, algo que se puede observar es que el 78.2% de sus partículas son menores a 0.074, lo cual es positivo debido a que entre menor sea el tamaño promedio de las partículas de la zeolita estas serán reactivas al momento de entrar en contacto con el agua y el hidróxido de calcio, con los resultados obtenidos en la tabla se podría concluir que la reacción puzolánica se generó de manera correcta debido a que la mayor parte de las partículas de la zeolita tienen el tamaño adecuado para ser reactivas.

Tabla IV.11.- Granulometría de la zeolita.

Tamiz	Abertura(mm)	Peso	Porcentaje	Porcentaje Acumulado (%)	
		Retenido (gr)	parcial retenido (%)	Retenido	Pasante
#30	0.6	0	0.000	0.000	100.000
#50	0.3	3.7	1.125	1.125	98.875
#100	0.15	13.3	4.044	5.169	94.831
#200	0.074	54.6	16.601	21.770	78.230

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura IV.8 se muestra la granulometría de la zeolita. Costafreda *et al.* (2011) menciona que el tamaño promedio de partículas para tener una reacción adecuada debe ser de 63µm. Se tomó en cuenta la tendencia que sigue la curva granulométrica de la zeolita, resultando que probablemente en esta zeolita un porcentaje cercano al 65% es menor al tamaño mínimo recomendado por el investigador lo cual es positivo. Sin embargo, se realizó la investigación con esta zeolita en este estado debido a que así es el estado en el que la entrega la empresa; además, de que triturarla tendría un precio extra, requería más tiempo y generaría contaminación adicional por el proceso de trituración. Debido a esto se decidió evaluar cómo funcionaría esta zeolita en la sustitución del cemento.

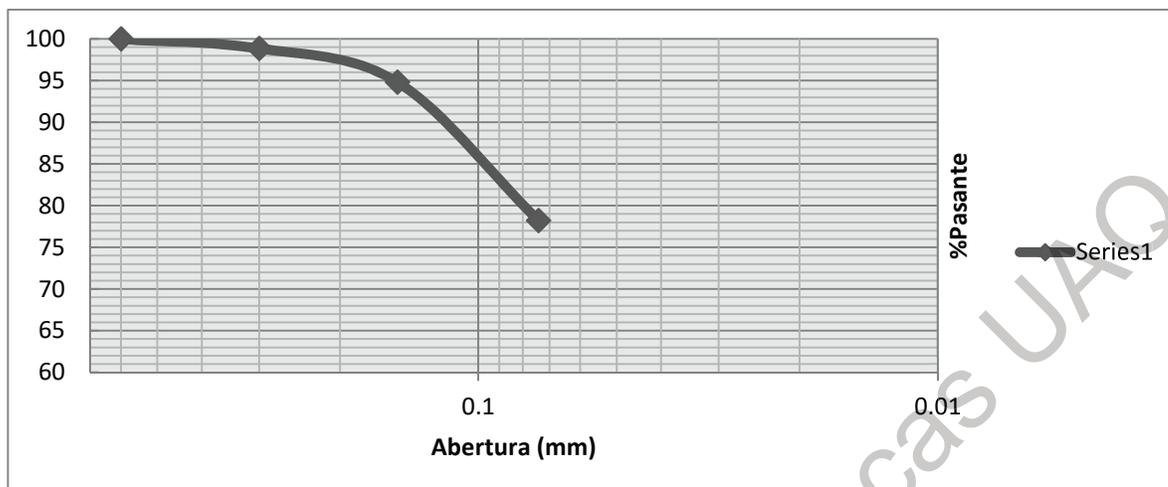


Figura IV-8.- Curva granulométrica de zeolita.

Fuente: Propia.

En la tabla IV.12 se muestra el resumen de los agregados en la cual se puede observar que cumple con la normativa o las recomendaciones del manual de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E) por lo cual se considera apto utilizarlos para la elaboración de concreto.

Tabla IV.12.- Resumen de características de agregados.

Propiedades	Grava	Arena	Cumple con normativa	
Densidad específica	2.81	2.12	-	-
Absorción (%)	1.04	2.6	Si	Si
Equivalente de arena (%)	N.A.	78.57	Si	-
Límite líquido	N.A.	38.9	-	Si
Límite plástico	N.A.	N.P.	-	Si
Índice plástico	N.A.	N.P.	-	Si
Módulo de finura	N.A.	2.67	-	Si
Desgaste los Ángeles (%)	10.67	N.P.	Si	-
Peso específico seco compacto (kg/m <sup>3</sup> )	1687.3	1287.3	-	-
Peso específico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1556.2	1174.9	-	-
Granulometría	-	-	Si	Si

En la tabla IV.13 se muestra el resumen de las propiedades de la zeolita, en la cual se puede observar que la zeolita cumple con las 2 propiedades más importante que menciona el investigador Costafreda *et al.* (2011) que son el tamaño de las partículas de zeolita y composición química recomendada, la normativa ASTM C618 recomienda que zeolita debe cumplir con las características que se muestran en la tabla IV.13 para que pueda utilizarse como sustituto del cemento.

Tabla IV.13.- Resumen de características de zeolita.

<b>Propiedades</b>	<b>Zeolita</b>	<b>Cumple con recomendaciones</b>
Clasificación:	Clinoptilolita	-
Tamaño promedio <63µm:	65 % <63µm	Si
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) >70%	85.033%	Si

### 4.3 Diseño de mezclas

Se utilizó el método ACI ya que es el más recomendado, se realizó el diseño de mezclas basándose en el método A.C.I (Del Comité 211.1) utilizando los datos que se obtuvieron en la caracterización del material, con el cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla IV.14.

Tabla IV.14.- Dosificación de la mezcla.

<b>Material</b>	<b>Material por m<sup>3</sup> (Kg)</b>	<b>Para 50.0 [L]</b>	<b>Material necesario para vigas y cilindros</b>
Agua	198	10.6	90.842
Cemento	395.6	24.4	186.710
Grava	1236.8	51.5	583.794
Arena	523.9	36.6	247.268

Fuente: Elaboración Propia.

Con base a la mezcla patrón que se muestra en la tabla IV.14 se realizó la sustitución parcial de zeolita del 5%,10% y 15%, valores que se fueron tomando con base al estado del arte, debido a que en este rango se obtienen mejoras en los parámetros mecánicos. En la tabla IV.15 se muestran las diferentes mezclas que se utilizaran en cantidad de material por m<sup>3</sup> para cada mezcla se necesitaron 0.138m<sup>3</sup>.

*Tabla IV.15.- Diferentes mezclas.*

<b>Mezcla</b>	<b>Agua (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Zeolita (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Grava (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Arena (kg/ m<sup>3</sup>)</b>
Control (CTR)	198	395.5	0	1236	523
Z-7	198	367.815	27.685	1236	523
Z-9	198	359.905	35.595	1236	523
Z-11	198	351.995	43.505	1236	523

Fuente: Elaboración Propia.

#### **4.4 Pruebas al concreto**

##### **4.4.1 Revenimiento**

Los resultados de las pruebas de concreto fresco se observan en la tabla IV.16. En comparación con los revenimientos recomendados en ACI 211.1, el revenimiento obtenido no se recomienda debido a que cuando se cuenta con valores bajos se vuelve más difícil trabajar y requiere más esfuerzo para extenderse, además, no es adecuado para algunas aplicaciones y es posible que el concreto no se logre consolidar correctamente. Otro detalle observado es que, con la incorporación de zeolita, la mezcla perdió trabajabilidad en proporción al aumento de zeolita, a pesar que todas las mezclas tienen un revenimiento de 0 entre mayor era el contenido de zeolita las mezclas eran más secas.

Tabla IV.16.- Revenimiento.

Mezcla	Tamaño máximo agregado	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Aditivo utilizado	Revenimiento (mm)	Consistencia
Control (CTR)	1 1/2"	350	-	0	Seca
Z-7	1 1/2"	350	-	0	Seca
Z-9	1 1/2"	350	-	0	Seca
Z-11	1 1/2"	350	-	0	Seca

Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la tabla IV.16, el revenimiento en todas las mezclas fue de 0 teniendo una consistencia seca como se muestra en la figura IV.9.



Figura IV-9.- Revenimiento 0.

#### 4.4.2 Resistencia a la compresión

De las pruebas de resistencia a la compresión que se realizaron en los cilindros de 150x300 mm con diferentes porcentajes de zeolita a las edades de 7,28 y 60 días, se

obtuvieron los resultados que se presentaron en la figura IV.10. En esta figura se presentan el promedio de 3 cilindros por cada mezcla y edad. Se puede observar que a los 7 días de edad el reemplazo de zeolita causó una reducción de la resistencia a la compresión en comparación con el espécimen de control; otro punto a mencionar es que a mayores niveles de reemplazo se presentaron reducciones más significativas. Según Akbar *et al.* (2013), esto podría explicarse debido a la lenta reacción puzolánica que genera la zeolita, lo que proporciona tasas más bajas de liberación de calor y un desarrollo gradual de la fuerza.

También se puede observar que de los 7-28 días de curado las mezclas con zeolita mostraron una ganancia significativa en la resistencia a la compresión y que todas las mezclas que contenían zeolita presentaron una mayor resistencia a la compresión que la mezcla de control después de los 28 días, con la excepción de la mezcla con 11% de reemplazo de zeolita.

Además, los valores de resistencia más altos se obtuvieron mediante la mezcla Z-9 a los 60 días.

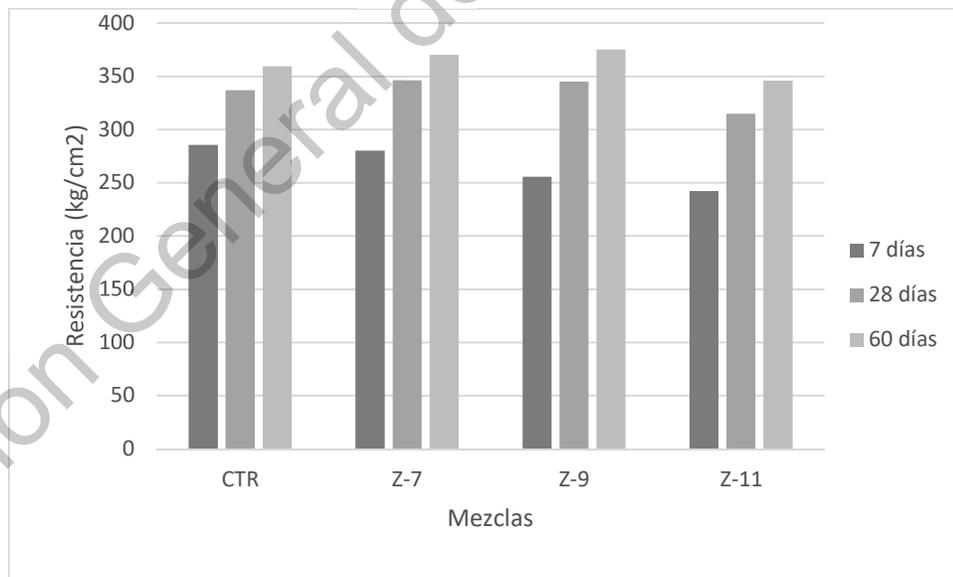


Figura IV-10.-Resistencias promedio a la compresión de distintas mezclas.

Fuente: Elaboración Propia.

Con estas mismas pruebas también se pudieron obtener las curvas de resistencia contra tiempo, las cuales se muestran en la figura IV.11. Se observa que el mayor incremento de resistencia se obtiene de los 7-28 días en los que, teóricamente, se dice que el concreto obtiene el 90% de su resistencia. También se puede observar que, después de los 28 días de curado, el concreto gana resistencia, pero cada vez de manera más lenta; en los especímenes con zeolita esta ganancia es mayor debido a que la zeolita retarda la reacción puzolánica.

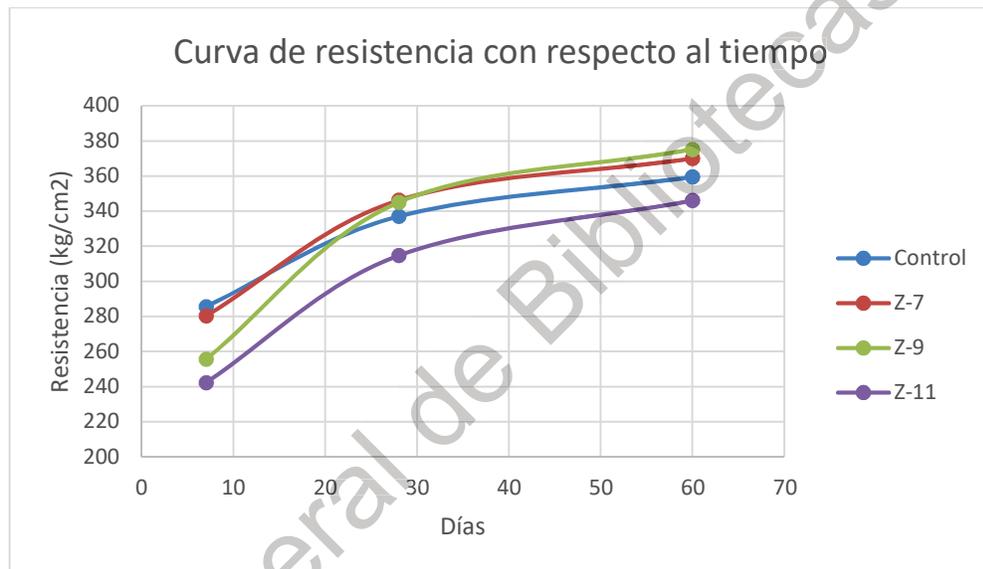


Figura IV-11.-Cruvas resistencia vs tiempo.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla IV.17 se muestra el porcentaje de mejora o disminución de cada una de las mezclas comparadas con la mezcla de control en las diferentes edades, como se puede observar el porcentaje de mejora con mejores resultados fue a los 60 días, con una mejora de un 4.34% comparado con el espécimen de control.

Tabla IV.17.- Comparativa de valores de resistencia.

Mezclas	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )			Comparativa con espécimen de control (%)		
	7 días	28 días	60 días	7 días	28 días	60 días
<b>Control</b>	285.65	337.15	359.58			
<b>Z-7</b>	280.28	346.29	370.09	-1.88	2.71	2.92
<b>Z-9</b>	255.65	345.08	375.20	-10.50	2.35	4.34
<b>Z-11</b>	242.33	314.80	346.14	-15.46	-6.63	-3.74

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.4.3 Resistencia a la flexión

De las pruebas de resistencia a la flexión que se realizaron en cilindros de 150x150x500 mm con diferentes porcentajes de zeolita a las edades de 7,28 y 60 días se obtuvieron los resultados que se presentaron en la figura IV.12. En esta figura se presenta un promedio de 2 vigas por cada mezcla y edad. Se puede observar que a las edades tempranas el reemplazo de zeolita causó una reducción de la resistencia en comparación con el espécimen de control; otro punto es que a mayores niveles de reemplazo se presentaron reducciones más significativas, esto se debe a lo explicado anteriormente (lenta reacción puzolánica).

La resistencia a la flexión sólo presentó mejorías en la mezcla Z-9 después de los 28 días; mientras que las mezclas Z-7 y Z-11 presentaron disminución de resistencia en todas las etapas. Sin embargo, en la mezcla Z-7 la resistencia después de los 28 días es prácticamente igual y en el caso de la mezcla Z-11 a los 60 días la resistencia es muy similar a la de control.

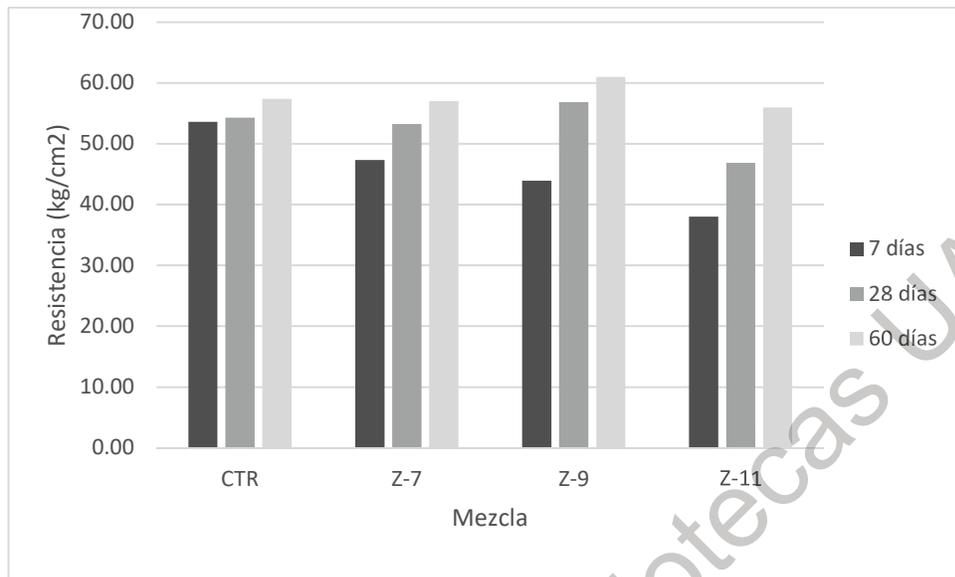


Figura IV-12.-Resistencias promedio a la flexión de distintas mezclas.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura IV.13 se pueden visualizar las curvas de resistencia de flexión contra tiempo. En estas se observa que el concreto obtiene casi aproximadamente el 90% de su resistencia en los primeros 28 días; además, también se observa cómo el espécimen de control casi no tiene incrementos de resistencia después de los 7 días, mientras que los especímenes con zeolita sí tienen incrementos significativos debido a que la zeolita retrasa un poco la reacción, lo que ocasiona que se obtengan mejores resultados a edades tardías.

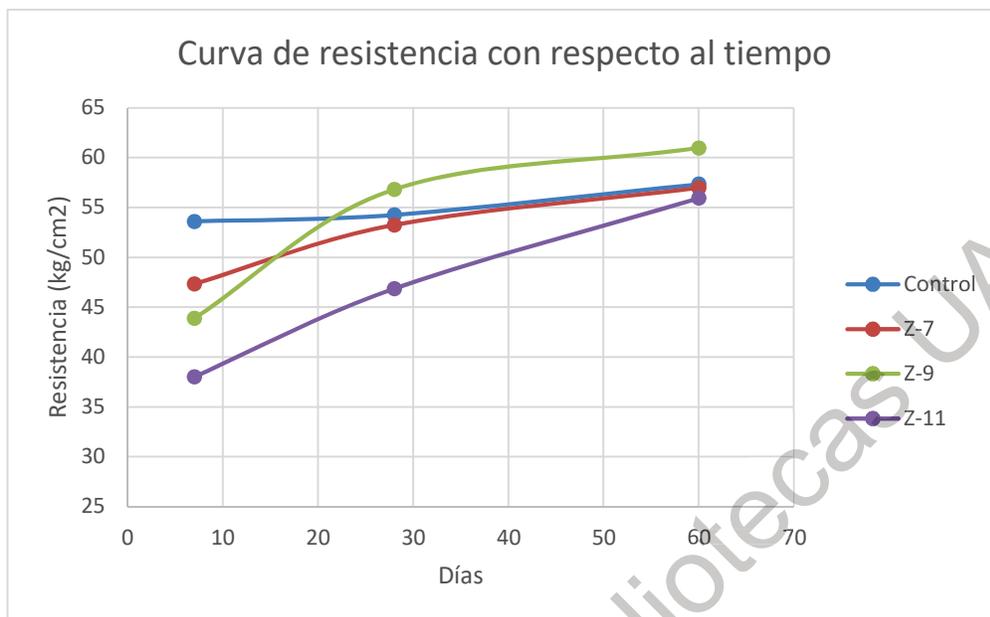


Figura IV-13.-Curvas resistencia vs tiempo.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla IV.18 se muestra el porcentaje de mejora o disminución de cada una de las mezclas comparadas con la mezcla de control en las diferentes edades, y como se puede observar, el porcentaje de mejora con mejores resultados fue a los 60 días en la mezcla Z-9 con una mejora de 6.29% comparado con el espécimen de control.

Tabla IV.18.- Comparativa de valores de resistencia.

Mezclas	R prom (kg/cm2)			Comparativa con espécimen de control (%)		
	7 días	28 días	60 días	7 días	28 días	60 días
<b>Control</b>	53.61	54.27	57.36			
<b>z-7</b>	47.34	53.26	57.00	-11.69	-1.88	-0.64
<b>z-9</b>	43.90	56.83	60.97	-18.11	4.70	6.29
<b>z-11</b>	38.03	46.87	55.95	-32.91	-13.64	-2.47

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.4.4 Comparativa económica de mezclas

En la tabla IV.19 se muestran los precios por m<sup>3</sup> de concreto de las distintas mezclas. Y, como se puede observar, los concretos con zeolita son un poco más económicos en un rango de 1.9-3%, por m<sup>3</sup> el ahorro es poco, pero ahorrar en concreto de un 1.9%-3% en una obra de grandes dimensiones; por ejemplo, una carretera de bastantes kilómetros sí podría tener un impacto significativo.

Tabla IV.19.- Comparativa económica de mezclas.

Mezcla	Costo (pesos)				Costo total (pesos)	Ahorro en %
	Arena	grava	Cemento	Zeolita		
Control	222.74276	\$255.90	\$1,265.60	\$0.00	\$1,744.24	
Z-7	222.74276	\$255.90	\$1,177.01	\$55.37	\$1,711.02	1.90%
Z-9	222.74276	\$255.90	\$1,151.70	\$71.19	\$1,701.53	2.45%
Z-11	222.74276	\$255.90	\$1,126.38	\$87.01	\$1,692.04	2.99%

Fuente: Elaboración Propia.

## CAPÍTULO V . –CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión aumento en un 4.34% al sustituir cemento por zeolita por lo cual se rechaza la hipótesis de que adicionar zeolita aumentaría la resistencia a la compresión simple en un 20% o más, sin embargo se considera la investigación satisfactoria debido a que se tuvieron mejoras en compresión y flexión teniendo en flexión una mejora de hasta 6.29% resultado que es más importante que la resistencia a la compresión debido a que al utilizar este concreto en pavimentos la compresión casi nunca es el problema sino no que el valor crítico para diseño siempre es la resistencia a la flexión, además de que esta hipótesis no se cumplió con esta zeolita pero con alguna zeolita más fina se podrían cumplir pero para fines prácticos se evaluó la zeolita proveniente de la Grupo TCDN S.A. DE C.V. en la tamaño que la empresa la entrega debido a que moler la zeolita tendría en tiempo y costo extra que no sería muy viable al momento de requerir grandes cantidades de zeolita en un obra de una dimensión considerable.

Los materiales de los bancos Corporativo AG cumplieron con los requerimientos que exige la Norma Mexicana para materiales que van a ser utilizados como agregados para concreto.

La granulometría de la zeolita es adecuada para tener una reacción significativa en la mezcla de concreto. La zeolita quedó clasificada como una zeolita clinoptilolita, pero con contenido apreciable de albita. Su principal compuesto es el  $\text{SiO}_2$  con un 68.25%, en las puzolanas entre más finas sean se produce una mejor reacción puzolánica. En este caso se decidió evaluar con las condiciones en las cuales la empresa entrega la zeolita debido a que hacer la zeolita más fina tendría un precio adicional y triturarla tomaría más tiempo, por lo cual en grandes obras esto ya no sería viable.

Realizar sustitución de zeolita por cemento hace que la mezcla requiera una mayor cantidad de agua para tener una fluidez similar a la mezcla de control. La trabajabilidad de las mezclas disminuye esto se notó al momento de realizar la compactación del concreto conforme aumenta la cantidad de sustitución de cemento por zeolita cada vez fue más difícil

realizar la compactación otra cosa que se pudo observar es que la mezclas conforme aumentaba la cantidad de sustitución de cemento por zeolita las mezclas se miraban cada vez más secas, para solucionar este problema sin tener que aumentar la cantidad de agua se recomienda utilizar un aditivo plastificante.

En el caso de la mezcla Z-11, la resistencia a la compresión y flexión bajó en todas las edades, pero los valores a los 60 días ya no se encontraban tan alejados presentaban una disminución del 2-3%; sin embargo, esto podría deberse a que no se pudo realizar una compactación adecuada debido a que esta mezcla presentaba una trabajabilidad muy baja por la incorporación de zeolita, lo que resultó en que algunas vigas y cilindros tuvieran pequeños poros en esta dosificación, por lo cual podría ser interesante analizar esta sustitución agregando pequeños incrementos de agua o un plastificante para que los especímenes ya no tengan poros.

En la edad temprana todas las mezclas presentaron valores menores al espécimen de control. Esto se debe a la lenta reacción puzolánica la que ocasiona que se retrase el fraguado de las mezclas; por lo tanto, se puede concluir que, si se busca concreto de resistencia rápida, la sustitución de cemento por zeolita no es viable debido a los concretos con zeolita tienen mejor comportamiento en edades tardías.

En las mezclas Z-7 y Z-9 la resistencia a la compresión aumentó en un rango de 2-3% en comparación con la mezcla de control a la edad de 28 días. En la mezcla Z-7 el módulo de ruptura fue prácticamente el mismo después de los 28 días. Considerando la precisión que marca la norma, se podría considerar que la mezcla de 7% y de control son iguales; en cuanto a la mezcla Z-9 el módulo de ruptura aumentó después de los 28 días reportándose el mayor incremento a los 60 días con un valor de 4.34%, el cual fue el mejor resultado logrado en todas las mezclas. Con esto se puede concluir que en cuanto a la resistencia a la compresión y flexión el concreto con una sustitución de 7-9% se comporta de la misma o mejor manera que el concreto sin zeolita. Los mejores resultados se presentaron en edades tardías, esto se debe a la lenta reacción puzolánica, la cual retarda la reacción.

Realizando una comparación de todas las mezclas analizadas en esta investigación, se llega a la conclusión de que sustituir cemento por zeolita hace que las mezclas sean más económicas desde 1.99% cuando se sustituye el 7% hasta un 2.99 % más económica por m<sup>3</sup> cuando se realiza una sustitución del 11%, y esto, en grades obras, puede suponer un ahorro económico bastante considerable por lo cual, en el aspecto económico, se puede considerar viable la sustitución.

Los usos de zeolita como sustituto de cemento son viables debido a que la zeolita es ecológicamente más amigable y el costo de la zeolita es más barato que el del cemento; además, la resistencia se mantiene o incrementa si se sustituye en los rangos adecuados. Se recomienda como porcentaje de sustitución óptimo el 9% debido a que tiene mejor resistencia a la compresión y flexión que el espécimen de control. A pesar de que la porción de 7% presentó mejores resultados a compresión a los 28 días en el caso de los pavimentos, o sea, su aplicación, el valor más importante es la flexión debido a que influye directamente al momento de calcular el espesor de la losa, para solucionar el problema de la trabajabilidad que pierde con este porcentaje de sustitución se recomienda utilizar un aditivo plastificante.

El realizar sustitución en el porcentaje óptimo del 9% contribuye con el medio ambiente debido a que la fabricación de cemento genera grandes cantidades de dióxido de carbono. Este porcentaje vuelve la mezcla más económica en un 2.45%, incrementa la resistencia a la compresión en un 2.35% a los 28 días y un 4.34% a los 60 días, y en cuanto a la resistencia a la flexión, incrementa su resistencia en un 4.70% a los 28 días y 6.29% a los 60 días con lo cual se concluye que este es el porcentaje óptimo.

## **Productividad**

Artículo publicado en Academic Journals Celaya 2018 En el Tecnológico Nacional de México en Celaya.

**Autores:** J.B. Hernández Zaragoza, L.G. Cruz Flores

**Título:** Mejoramiento de la resistencia a la compresión del concreto mediante zeolita.

## **Recomendaciones**

Realizar más mezclas de concreto sustituyendo del 10%-15% pero agregando más agua y aditivos, también sería interesante realizar las mismas dosificaciones que se realizaron con otras zeolitas de la región de México para realizar una comparativa y poder establecer por qué se obtienen mejores resultados con algunas zeolitas.

Realizar experimentación de sustitución de cemento por zeolita y cal, debido a que el principal componente de la cal es el óxido de calcio el cual reacciona al entrar en contacto con la sílice que es el principal componente de la zeolita probablemente se podrían realizar mayores sustituciones.

## CAPÍTULO VI. - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akbar, R., Ali, K., Morteza, S., & Babak, A. (2013). *Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability*. *J Mater Civ Eng*, 25(5), 589-596.

Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2010). *Radiation shielding of concrete containing zeolite*. *Radiation Measurements*, 45(7), 827-830.

*ASTM C 173*, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM C1365-06(2011), Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.

ASTM C39 / C39M-17b, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM C494 / C494M-13, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM C494 / C494M-17, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM C618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)

Badea, C. y Iures, L., Concrete (S.F.), “Concrete”, Building Faculty, University of Timisoara, Timișoara, Romania.

Boháč, M., Kubátová, D., Nečas, R., Zezulová, A., Masárová, A., & Novotný, R. (2016). *Properties of Cement Pastes with Zeolite During Early Stage of Hydration*. *Procedia Engineering*, 151, 2-9. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.349

Bosch, P. y Schifter, I. (2003). *La zeolita. Una piedra que hierve*. Primera reimpresión. México: Fondo de cultura económica SEP.

Comisión Federal de Electricidad, sección 3 (1994), *Manual de Tecnología del Concreto, Concreto en Estado Endurecido*. Limusa, Noriega Editores. México. ISBN: 968-18-5036-X.

Costafreda, J. (2014). *Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales*. Madrid, España: Editorial Fundación Gómez Pardo.

Costafreda, J., Calvo, B. y Parra, J. (S.F.) *Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones*, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

Costafreda, J., Díaz, J. y Calvo, B. (2011). *Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España*. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2011. La Habana, Cuba. Págs. 9.de barrido para el estudio de Coccoidea (Insecta: Hemiptera). *Insecta Mundi*, 1-5.

Demuth, T., Benco, L., Hafner, J. y Toulhoat, H. (2000). *Adsorption of water in mordenite. An ab initio study*. *International Journal of Quantum Chemistry*, vol. 84. pp. 110-116.

Dopico, J., Martirena, J., Lopez, A. y González, R. (2009). *Efecto de la adición mineral cal- zeolita sobre la resistencia a la compresión y la durabilidad de un hormigón*, *Ingeniera de la construcción*, 2, 181-194.

Escandón, C., Velasco, D., López, C., & Agredo, J. (2012). *Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción*. Acta Agronómica, 61(5), 77-78.

Eskandari, H., Vaghefi, M., y Kowsari, K. (2015). *Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite*. Procedia Materials Science 11, vol.11. pp. 594-599.

Falcone, D., Sota, J., Batic, O. (2002). *Modificación de las características físico-mecánicas al adicionar puzolanas naturales a los morteros con cemento portland*. CONAMET/SAM 'Simposio materia 2002', Chile: Universidad de Chile.

Felipe, M., Xiao, Y., Kubick, J. (2001) *Molecular orbital modeling and transition state theory in geochemistry*. Rev Miner Geochem 42:485-531

Feng, N., Jia., H. (1995). *Prevention of AAR in cement concrete with natural zeolite*. Concr Cement Products 1995;2 [in Chinese].

Feng, N., Wang, R., et al. (1979). *Zeolite cement and concrete*. Concr Reinforced Concr. 1979;1 [in Chinese].

Feng, N. (1993). *High strength concrete with F-mineral powder and strengthening admixture and its application in practice*. Constr Technol 1993;8 [in Chinese].

Feng., N. (1987). *High strength concrete with F-mineral powder*. Concr Reinforced Concr 1987;3 [in Chinese].

Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Católica de Colombia.

Fuentes, E. y Martínez, M. (2007). *Fabricación de morteros industriales para la construcción*. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. pp.1-10.

Georgiev, D., Bogdanov, B., Angelova, K., Markovska, K. et al., & Hristov, Y., (2009) *Synthetic zeolites - structure, classification, current trends in zeolite synthesis - review*. 4th - 5th International Science conference in Stara Zagora, Bulgaria.

Gutiérrez de López, L. (2003) *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. ISBN 958-9322-82-4.

Gutierrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Colombia: Universidad nacional de Colombia.

Hernández, M. A., Rojas, F., Lara, V. H., Portillo, R., Castelán, R., Pérez, G. y Salas, R. (2010). Estructura porosa y propiedades estructurales de modernita y clinoptilolita. *Superficies y Vacío*. 23(S): 51-56.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, (2006) *Los aditivos para concretos*. México. Autor. 38 p.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, (2006) *Los aditivos para concretos en seis pasos*. Construcción y tecnología.38.

Janotka, I., Krajci, L. (2008) *Sulfate resistance and passivation ability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite*, J. Therm. Anal. Calorim. 94 7–14.

Kosmatka S., Panarese W. (1992). “Diseño y control de mezclas de concreto,” IMCYC, México, 1992, pp. 32-34.

Kosmatka Steven H. y Panarese William C. (1992), *Diseño y control de mezclas de concreto*. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-074-9.

Lobo, R. F. (2003). *Introduction to the structural chemistry of zeolites*. En: *Handbook of zeolite science and technology*. pp. 65-89.

Lobo, R. F. (2003). *Introduction to the structural chemistry of zeolites*. En: *Handbook of zeolite science and technology*. pp. 65-89

Malhotra, V.,y Mehta, P. (1996) *Pozzolanic and cementitious materials*, UK: Taylor & Francis.

Małolepszy, J., & Grabowska, E. (2015). *Sulphate Attack Resistance of Cement with Zeolite Additive*. *Procedia Engineering*, 108, 170-176.

Markiv, T., Sobol, K., Franus M. y Franus W. (2016). *Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite*, *Archives of civil and mechanical engineering*, 16, 554–562.

Márquez, C., Solano, R., Arrieta, M., Chávez, V., Atencio, R., González, E. y Rodríguez, D. 2014. Síntesis y caracterización de zeolitas Y desaluminadas para la reacción de alquilación de benceno con dodeceno. *Ciencia*. 22: 121-128.

Mehta Kumar y Monteiro Paulo. (1998), *Concreto, estructura, propiedades y materiales*. IMCYC. México. D.F. ISBN: 968-464-083-8.

Meier, W. *Proc. Conf. Molec. Sieves*, Lond. 10 (1968).

Miranda, I., Arvizu, J., Almada, A., Celaya, M., Flores, D., & Brockman, S. (2014). ESTUDIO DEL IMPACTO TÉCNICO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO POR LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ZEOLITA. *Iberoamerican Journal of Project Management*, 5(1), 01-10.

Nagrockiene, D. y Girskas, D. (2016). *Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition*, *Construction and Building Materials*, 113, 964–969.

Nagrockienė, D., Girskas, G., & Skripkiūnas, G. (2017). Properties of concrete modified with mineral additives. *Construction And Building Materials*, 135, 37-42.

Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi B. y Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, 35, 1023-1033.

Neville, M. (1999), *Tecnología del concreto*. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968464-092-7.

NTC 30, *Cemento Portland. Clasificación y nomenclatura*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, 2014.

Olivera, F. (1986). Estructuración de vías terrestres. México: Editorial: Grupo editorial patria.

Park, S., Kim, J., Nam, J., Phan, H., & Kim, J. (2009). Development of anti-fungal mortar and concrete using Zeolite and Zeocarbon microcapsules. *Cement And Concrete Composites*, 31(7), 447-453.

Patel, J., & Raijiwala, D. (2015). Experimental Study on Use of Sugar Cane Bagasse Ash in Concrete by Partially Replacement with Cement. *International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology*, 4(4), 2228-2232.

Pavelić, K. y Hadžija, M. (2003). Medical applications of zeolites. En: *Handbook of zeolite science and technology*. pp. 1141-1172.

Pérez, D., Buxó, P., Maza, S., Mirabal, R., Ongay, M. y Ruiz, M. (1997). Depósitos de zeolitas. *Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Fundació Folch*. pp. 333341.

Perez, O., Carballo, D. y Ruiz, S. (2013) Generalización de la utilización de zeolita menor de 0.8 mm en la elaboración de hormigones, *Convención cubana de ciencias de la tierra, GeoMinera del Centro, La Habana*.

Portland Cement Association (1984), *Thickness design for concrete highway and street pavements*, Estados Unidos.

Rico A. y Castillo. H. (1992). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México D.F: Editorial Limusa.

Rosell, M. (2007). Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. *Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007*. pp.1-9.

Salazar, A. (2015), *Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos*, México, D.F.: Soledad Moliné Venanzi.

Sanchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y mortero*, Bogota: Bhandar editores LTDA.

Sánchez, M. y Frias, M. (1996) The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 203–13.

Saracho Bottero, A., & Claps, L. (2015). Nueva técnica de microscopía electrónica.

SCT (2008). Norma Oficial Mexicana N-CMT-2-02-/02. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario Oficial de la Federación 16 de diciembre de 2008.

Soria, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de Construcción*, 190-191, 69-84.

Stulz, R. & Mukerji, R. (1993). *Materiales de construcción apropiados*, Switzerland:SKAT.

Takemoto K, Uchikawa H (1980) Hydratation des ciments pouzzolaniques. *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement IV-2:1-29*.

Talero Morales, R. (1986), "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Pozolánicos-Yeso-Agua (a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ )", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Uribe R. (1991). El control de calidad en los agregados para concreto 3 a parte. "Construcción y tecnología," (México), (40), p. 34.

Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M. y Khani, S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: a laboratory study, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 879–88.

Vargas, Y., Obaya, A., Vargas, G., Gómez V., Chávez, J., y García A. Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores dentro del Observatorio Virtual Ixtli, UNAM, *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 1 de mayo de 2013, Vol. 14, No.5.

*Walker, R., y Pavía, S. (2010). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. Materials And Structures, 44(6), 1139-1150.*

Dirección General de Bibliotecas UAQ