



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de pavimentos rígidos a través  
de aditivos líquidos

Tesis

Que como parte para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta

Ing. Luis Jaime Pantoja Peña

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dra. Teresa López Lara  
Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Diciembre 2019  
México

## RESUMEN

Tras el paso del tiempo se han intentado y probado distintos métodos para mejorar los pavimentos, esto teniendo en cuenta sin afectar otros aspectos como por ejemplo el ambiental. El uso de aditivos ha sido uno de los métodos innovadores que ha traído cambios positivos a los pavimentos; el mejoramiento a las propiedades en el concreto, o la reducción de costos en la construcción, por mencionar algunos. En este estudio, se utilizó poliestireno expandido (EPS) en forma líquida, adicionándolo al concreto para utilizarlo como pavimento rígido. Se investigaron los resultados de mezclar diferentes proporciones del polímero (1,3,5,7 y 10% basado en el peso total de la muestra) y también reemplazar el cemento con estas proporciones del aditivo (primero en muestras de mortero y luego en concreto), por lo que se evaluaron la resistencia a la compresión y flexión. La mejor resistencia fue la compresión, reemplazando el 5% del cemento, incluso más que las muestras de control.

**(Palabras clave:** Pavimentos, aditivos, poliestireno expandido, concreto, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión)

## SUMMARY

After the years, different methods to enhance pavements have been tried and tested, taking into account without affecting other aspects such as environmental. The use of additives has been one of the innovative methods that has brought positive changes to the roadways; the improvement of concrete properties, or the reduction of construction costs, to name a few. In this study, expanded polystyrene (EPS) was used in a liquid form in addition to concrete to utilize it as a rigid pavement. Results of mixing different proportions of the polymer (1,3,5,7 y 10% based on the total weight of the specimen) and also replacing the cement with the mentioned proportions, (first in mortar specimens and then in concrete) so, on the compressive and flexural strengths were examined. The best resistance was in compression, replacing 5% of the cement, even higher than the control samples.

**(Keywords:** Pavements, additives, expanded polystyrene, concrete, compressive strength, flexural strength)

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis papás, quienes son el motivo y la razón de que hoy este aquí, cumpliendo esta meta tan anhelada.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## AGRADECIMIENTOS

A quien dirige mi camino, quien me ha acompañado siempre, ayudándome a aprender de mis errores, protegiéndome en cada momento de mi vida ... a Dios.

A mis papás, María Guadalupe Peña Domínguez y Jaime Pantoja Ávila, por haberme formado como la persona que soy en la actualidad, estar en todo momento al cuidado de mí, pues aún lejos físicamente siempre sentí que estaban a mi lado. A ustedes por creer en mí, por todo su amor y por su apoyo incondicional. Los amo muchísimo.

A mi familia Peña Domínguez, por su invaluable cariño, por estar conmigo en cada etapa de mi persona y ser partícipes de este sueño que hoy culmina. Por ser mis segundas madres, segundos padres y hermanos.

A quienes ya no están con nosotros... por sus enseñanzas, su cariño tan grande, porque en su vida fueron pilares de la mía y por haberme dejado su presencia por lo que resta de mi existencia... a mi Mama Chela y José Emmanuel Ruiz Dávila.

A mi novia, Wendy Fisher, por haber sido fundamental en alcanzar este objetivo que no fue sencillo, sin embargo, estuviste motivándome para nunca rendirme, diciéndome que lo lograría y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían.

A mi director de tesis el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, que con su experiencia y conocimiento me asesoró en todo momento para desarrollar este proyecto de investigación.

A mis sinodales la Dra. Teresa López Lara, el Dr. Saul Antonio Obregón Biosca, el Dr. Jaime Horta Rangel y el Dr. Francisco Javier García Rodríguez por haberme otorgado su tiempo durante estos dos años, así como para revisar y aconsejar este trabajo final.

A mis compañeros y amigos de maestría: Daniela, Jorge, Leonardo y Luis, además de su amistad, por su apoyo en diferentes situaciones durante estos dos años.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), la Facultad de Ingeniería (FI) y a la División de Investigación y Posgrado (DIPFI) por permitirme continuar con mis estudios profesionales mediante un posgrado de calidad.

A la Universidad de Medellín que, a través de sus instalaciones contribuyeron en la continuación de esta tesis, además de permitirme vivir una nueva experiencia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), institución que me brindo gran parte del apoyo económico durante mis estudios de maestría.

A todas estas personas y en general a todas aquellas quienes estuvieron involucradas en esta etapa de mi vida, gracias.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	1
SUMMARY.....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
TABLA DE CONTENIDOS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
INDICE DE FIGURAS .....	9
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
1.1    GENERALIDADES .....	12
1.2    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	13
1.3    JUSTIFICACIÓN.....	14
1.4    HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	15
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>16</b>
2.1    PAVIMENTOS .....	16
2.1.1 <i>Pavimentos flexibles</i> .....	16
2.1.2 <i>Pavimentos rígidos</i> .....	18
2.2    ADITIVOS .....	26
2.2.1 <i>Aditivos en el concreto</i> .....	29
2.3    ADITIVOS POLIMÉRICOS.....	36
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>38</b>
3.1    SELECCIÓN DE MATERIALES .....	38
3.1.1 <i>Agregados pétreos</i> .....	39
3.1.2 <i>Cemento y agua</i> .....	50
3.1.3 <i>Poliestireno expandido</i> .....	51
3.2    DISEÑO DE MEZCLAS Y ADITIVO .....	52
3.3    FABRICACIÓN Y CONTROL DE ESPECÍMENES.....	54

3.4	ANÁLISIS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ESPECÍMENES .....	55
3.4.1	<i>Resistencia a la compresión</i> .....	55
3.4.2	<i>Resistencia a la flexión</i> .....	58
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	61
4.1	SELECCIÓN DE MATERIALES .....	61
4.1.1	<i>Agregado pétreo</i> .....	61
4.1.2	<i>Cemento y agua</i> .....	63
4.1.3	<i>Poliestireno expandido</i> .....	63
4.2	DISEÑO DE MEZCLAS Y ADITIVO .....	64
4.3	FABRICACIÓN Y CONTROL DE ESPECÍMENES.....	65
4.4	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS .....	68
4.4.1	<i>Resistencia a la compresión</i> .....	68
4.4.2	<i>Resistencia a la flexión</i> .....	73
5.	CONCLUSIONES .....	76
6.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION.....	78
7.	REFERENCIAS .....	79



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
2.1 Periodos de diseño respecto al tipo de camino.....	22
2.2 Desviación Normal Estándar.....	23
2.3 índice de servicio.....	24
2.4 Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos. ....	26
2.5 Variación en la resistencia a compresión de diferentes mezclas. ....	32
3.1 Tipos de agua y sus efectos en el concreto. ....	50
3.2 Módulo de ruptura recomendado. ....	59
4.1 Caracterización de materiales.....	61
4.2 Análisis del poliestireno expandido (EPS).....	63
4.3 Especímenes de mortero con sus proporciones. ....	65
4.4 Diferentes especímenes de concreto con sus proporciones. ....	67
4.5 Resultados de los cubos de mortero.....	68
4.6 Resultados de los cubos de mortero en sustitución.....	69

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
2.1 Estructura de un pavimento flexible.....	17
2.2 Diseño de un pavimento rígido.....	19
2.3 Clasificación de los polímeros a) lineal b) ramificado c) entrecruzado .....	28
2.4 Clasificación de los polímeros.....	28
2.5 Resultados de la resistencia a la flexión.....	29
2.6 Resultados de la resistencia a la compresión.....	30
2.7 Relación entre resistencia a la compresión y contenido de aditivo.....	31
2.8 Resistencia a la compresión en diferentes mezclas.....	32
3.1 Metodología aplicada.....	38
3.2 Muestreo del agregado grueso del banco de materiales.....	40
3.3 Agregado fino.....	40
3.4 Reducción del material grueso.....	42
3.5 Cuarteo de una porción del agregado fino.....	42
3.6 Condición saturada superficialmente seca del agregado fino.....	43
3.7 Condición saturada superficialmente seca del agregado grueso.....	44
3.8 Cribado de la fracción fina.....	45
3.9 Tamizado de la malla No. 4.....	45
3.10 Parte del procedimiento en la prueba equivalente de arena.....	47

3.11 Prueba del límite líquido con el cono inglés. ....	48
3.12 Preparación de la prueba de desgaste de los Ángeles. ....	49
3.13 Poliestireno expandido sólido. ....	52
3.14 Partículas homogéneas de EPS. ....	54
3.15 Prueba de resistencia a la compresión. ....	56
3.16 Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión. ....	57
3.17 Prueba de módulo de ruptura. ....	58
4.1 Análisis granulométrico. ....	62
4.2 Análisis granulométrico del agregado grueso. ....	62
4.3 EPS de forma líquida. ....	64
4.4 Preparación de un cubo de mortero con EPS líquido. ....	66
4.5 Cubo de mortero con EPS líquido. ....	66
4.6 Resultados de la resistencia a la compresión en cubos de mortero. ....	68
4.7 Morteros con sustitución a 28 días. ....	69
4.8 Especímenes de concreto a 3 días. ....	70
4.9 Especímenes de concreto a 7 días. ....	71
4.10 Especímenes de concreto a 28 días. ....	71
4.11 Resultados de la resistencia a la compresión. ....	72
4.12 Especímenes de concreto a 3 días. ....	73
4.13 Especímenes de concreto a 7 días. ....	74

4.14 Especímenes de concreto a 28 días. .... 74

4.15 Especímenes de concreto a 28 días. .... 75

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 1. INTRODUCCIÓN

### Generalidades

Al inicio de los tiempos, las antiguas civilizaciones edificaban caminos con la finalidad de la estructuración de su imperio, y así movilizarse de manera eficiente para la conquista de nuevos territorios, a su vez el intercambio de mercancías era favorecido al contar con una red viaria lo bastante amplia, por otra parte, las calzadas también tuvieron gran impacto en el intercambio entre culturas. De igual forma, en la actualidad la infraestructura es un elemento fundamental en el impulso económico de cada nación, donde se construye una carretera se da paso al progreso y desarrollo de un país.

El asfalto es definitivamente el material para construcción de carreteras más utilizado en el mundo, constituye más del 90 por ciento de las superficies en los Estados Unidos y en Europa, de acuerdo a Lavelle (2011) en México el porcentaje de pavimentos asfálticos es aproximadamente del 96%, esto debido a ser un país productor de petróleo argumentan Bildirici y Ozaksoy (2018). Desafortunadamente se han presentado múltiples factores que hace que el asfalto no sea apto para el incremento de los niveles de tráfico y condiciones climáticas extremas.

Neymet (1965) afirma que los antecedentes más remotos de los aditivos se encuentran en los concretos romanos pues utilizaban la sangre de animales para adicionarla a los componentes de los concretos y darles mayor plasticidad.

En 1945 el Instituto Americano del Concreto (ACI) publicó el primer reporte sobre estudios e investigaciones de aditivos que se encontraban en el mercado de los Estados Unidos y los agrupó según las propiedades que se le atribuían.

Particularmente, Akchurin *et al.* (2016) revelan que el uso de aditivos químicos y minerales es la forma más efectiva de mejorar la calidad del concreto y darle propiedades específicas.

## Descripción del problema

Podemos dividir la descripción del problema en dos vertientes: el alto nivel de tráfico existente y la contaminación generada a partir de la producción de cemento y/o residuos de poliestireno.

Aunque los pavimentos asfálticos se han desempeñado bien a lo largo de los años, día con día nuestros caminos se ven afectados por los altos niveles de tráfico, que en las últimas décadas se ha incrementado de manera exponencial reduciendo la vida útil de dichas carreteras, declaran Wang *et al.* (2017), Boikova *et al.* (2017) y Polacco *et al.* (2015).

Otro aspecto muy importante es el medio ambiente, Curry (2010) reporta que se emite casi una tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por cada tonelada de cemento producido en los Estados Unidos, así como Chen *et al.* (2010) y Barker *et al.* (2009) informan que la fabricación de cemento contribuye al calentamiento global representando del 5% al 7% de las emisiones de dióxido de carbono, por lo tanto, reemplazando un porcentaje de cemento con un aditivo será benéfico tanto como para el medio ambiente así como para los pavimentos.

Por último, Schmidt *et al.* (2011) estiman que la producción mundial de poliestireno expandido (EPS) es de 3 millones de toneladas anuales, de igual manera Kan y Demirboga (2009) expresan que los residuos de (EPS) han causado gran cantidad de contaminación ambiental porque no se pueden descomponer en la naturaleza.

## Justificación

En base a la *Portland Cement Association* (1974), los pavimentos rígidos demuestran beneficios sobre los pavimentos flexibles, menciona la vida útil y los costos tanto de operación y de mantenimiento como las ventajas del concreto. Igualmente, Ochoa (2014) aparte de estos beneficios también incluye la seguridad, la mejor distribución de esfuerzos y los altos niveles de servicio.

Además, Milind and Kadam (2016) y Korochkin (2018) indican que aparte de su durabilidad, otra ventaja de los pavimentos de concreto es su habilidad de mantener su forma frente al tráfico y condiciones ambientales difíciles, su resistencia es de 2 a 3 veces más que la del asfalto.

De acuerdo a Cadere *et al.* (2017) y Yang *et al.* (2017) el concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción, por lo tanto, cuando se trata de una carretera con un alto volumen de tráfico, los pavimentos rígidos se convierten en una mejor opción en los últimos años.

Por otra parte, Payá *et al.* (2010) concluyen que al utilizar un aditivo natural en los pavimentos rígidos obtenemos un concreto más resistente a la compresión. De igual manera, acorde a Mohajerani *et al.* (2017) el poliestireno expandido (EPS) mejora diferentes propiedades en el concreto, siendo la resistencia a la compresión una de ellas.

Por tanto y conforme a lo expuesto por la *Portland Cement Association* (1974), Ochoa (2014), Milind and Kadam (2016), Korochkin (2018), Cadere *et al.* (2018), Yang *et al.* (2017), Payá *et al.* (2010) y Mohajerani *et al.* (2017), podemos concluir que un concreto sin aditivos no podrá satisfacer todas las cualidades mencionadas y es ahí donde con los aditivos se puede brindar al concreto mejores propiedades mecánicas que un concreto “convencional” no puede satisfacer.

## **Hipótesis y objetivos**

Hipótesis:

La utilización de los aditivos poliméricos acrílicos en pavimentos rígidos de tránsito medio generará mejoramiento hasta un 25% en sus propiedades mecánicas.

Objetivos:

Demostrar que un aditivo polimérico mezclado con cemento portland puede obtener las mismas o mejores propiedades mecánicas que un pavimento rígido convencional.

Al reducir el uso del cemento, reemplazándolo con aditivos, se reducirán los costos y la contaminación.



## 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se mencionan los aspectos y características de los pavimentos, haciendo énfasis en los pavimentos rígidos, su composición y la importancia de su diseño, asimismo las características de aditivos poliméricos (especialmente el poliestireno expandido) con la finalidad de implementarlos en los pavimentos de concreto.

### **Pavimentos**

#### **Pavimentos flexibles**

Para definir lo que es un pavimento la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1998) concluye que:

*“Es la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodamiento y cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías, distribuyéndolas en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales en ellas”*

En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto argumentan Rico y Del Castillo (1992). Con referencia a dichos autores (1977) existen dos tipos de pavimentos respecto del material que los constituya: flexibles y rígidos.

Zarate (2003) explica que los pavimentos flexibles están formados por capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad, cuentan con una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica, por lo que también se les denomina pavimentos asfálticos.

Por su parte, Olivera (2004), coincide sobre los pavimentos flexibles, que una carpeta asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; las cargas de los

vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales; las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y sub-base, se construyen sobre la capa subrasante.

Por último, un pavimento flexible es el tipo de pavimentos que está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base, puntualiza Montejó (2008), como se aprecia en la figura 2.1.

La resistencia estructural, deformabilidad, capas de transición, drenaje, durabilidad, el costo, los requerimientos de conservación y la comodidad son las características fundamentales de un pavimento flexible, explican diversos autores.

Algunas ventajas que podemos mencionar de los pavimentos flexibles son su menor costo de construcción, mayor comodidad en el tránsito, resistencia al derrapamiento así como al drenaje superficial y por último la reutilización de mezclas asfálticas.

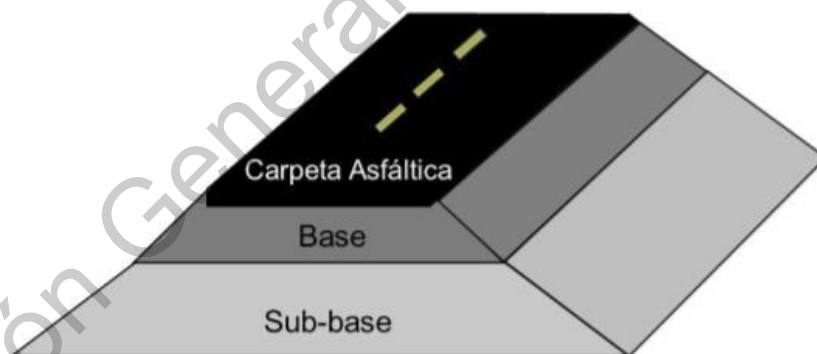


Figura 2.1 Estructura de un pavimento flexible.

Fuente: Sánchez Sabogal (2005).

## **Pavimentos rígidos**

El uso de los pavimentos rígidos se dio en Estados Unidos en 1830, debido a la necesidad del país del norte de caminos y rutas transitables para el transporte masivo. El crecimiento demográfico experimentado durante el siglo XIX procuraba nuevas vías de transporte. Fue el ingeniero escocés John Loudon Mc Adam el inventor del “macadam”, un nuevo tipo de superficie apto para soportar el peso de los renovados vehículos y transportes de carga.

El macadam consistía en pequeñas gramillas de piedra y capas de rocas, lo que permitía un óptimo drenaje del agua de lluvia. En 1830 se construye en el Estado de Ohio la “National Road”, primera ruta construida bajo este método.

La utilización de estos pavimentos se remonta a más de 100 años. George Bartholomew, un norteamericano de Ohio, realizó las primeras pruebas en una faja experimental de 2.44 metros de ancho. Este descubrimiento dio inicio al proyecto de obras públicas más grande en la historia de la humanidad: el sistema de carreteras inter-estatal de los Estados Unidos de Norteamérica, con aproximadamente 27.500 Km de longitud.

En la ciudad de Mexico, una de las primeras carreteras de concreto se realizó en la primera mitad del siglo XXI, inaugurada en la década de los treinta, atraviesa el Parque Nacional del Desierto de los Leones explica Celis (2011).

Los pavimentos rígidos según Crespo-Villalaz (2011) son aquellos formados por una losa de concreto hidráulico sobre una base o directamente una subrasante, como se puede observar en la figura 2.2.

La capa sub-base eventualmente se le denomina base, por su posición inmediatamente bajo la losa. Sin embargo, se le designa como subbase debido a

que en general los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base en un pavimento flexible expone Zarate *et al* (2002).

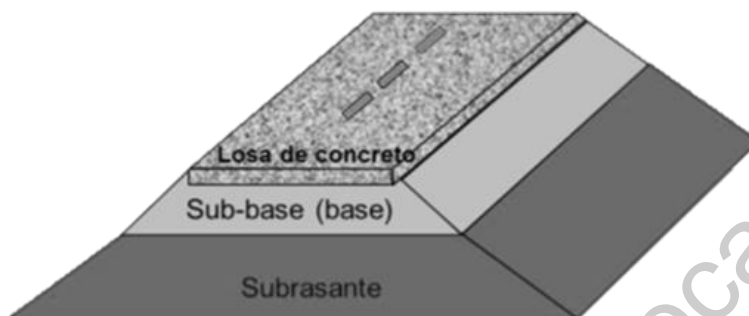


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2 Diseño de un pavimento rígido.

Fuente: Sanchez Sabogal F. (2005).

De tal manera actualmente las propiedades principales del pavimento rígido, citando al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2004) son: la trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad.

Huang (2004) nos indica que el esfuerzo de flexión en el concreto del pavimento se ha considerado desde hace mucho tiempo como su mayor, o incluso el único, factor de diseño importante.

Ahora bien, la *Portland Cement Association* (1984) cataloga los pavimentos de concreto en cuatro tipos: i) Concreto sin refuerzo. ii) Concreto reforzado con juntas. iii) Concreto con refuerzo continuo. iv) Concreto pre esforzado. Mientras O'Flaherty (2002) hace la misma clasificación en su libro, Huang (2004) coincide con ambos en la clasificación, sin embargo, menciona que pueden existir también pavimentos de concreto postensado y compactados con rodillos.

Por otra parte, Huerta (2002) clasifica las juntas que existen en los pavimentos de la siguiente manera: i) Juntas longitudinales ii) Juntas transversales. iii) Juntas de contracción. iv) Juntas de construcción v) Juntas de dilatación. vi) Juntas especiales.

Una parte muy importante es el colado del concreto, tiene que ser apto para no dañar la subbase y tener lo mínimo de segregación. Posteriormente la compactación se realiza normalmente mediante el uso de vibradores de alta frecuencia, trabajando sumergidos en el concreto, expone Neville (1999). Antes del acabado superficial como argumenta Salazar (2011), la comprobación de superficie es habitualmente ejecutada mediante una regla metálica en el sentido longitudinal de la losa, siendo un perfilografo quien podría dar un resultado más exacto en el acabado.

El método de diseño de pavimentos utilizado por la *American Association of Highways and Transportation Officials* (1993) está basado en una prueba denominada "Prueba AASHO", realizada entre 1951 y 1960 en Illinois, que se utiliza para estudiar el comportamiento de estructura de pavimento de espesores conocidos, ante cargas móviles de magnitudes y frecuencias también conocidas y bajo el efecto del medio ambiente.

El método AASHTO, está establecido en el modelo de ecuación de diseño, basado en la pérdida del índice de serviciabilidad durante la vida útil del pavimento, siendo este índice un parámetro que representa las bondades de la superficie del pavimento. El diseño involucra el análisis de factores como lo son: i) tráfico; ii) drenaje; iii) clima; iv) características de los suelos; v) transferencias de cargas; vi) nivel de servicio deseado; vii) grado de confiabilidad.

La ecuación de diseño 2.1 que se presenta a continuación es para considerar un espesor de un pavimento de concreto hidráulico para que este pueda soportar el paso de un cierto número de ejes equivalentes de 18 kilolibras sin que se produzca una disminución en el índice de servicio superior a un valor determinado de  $\Delta PSI$  (pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño).

$$\log_{10}(E18) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32 \times p_t) \times \log_{10} \left\{ \frac{S'c \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{Ec}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right\}$$

Ecuación *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1*  
Fuente: AASHTO (1993).

Donde:

- *E18 = Tránsito en ejes equivalentes de 8.2 t (18 kip)*
- *Zr = desviación normal estándar para “R”*
- *So = desviación estándar*
- *D = espesor*
- *ΔPSI = Diferencia de serviciabilidad*
- *Pt = Serviciabilidad final*
- *MR = Módulo de ruptura del concreto*
- *Cd = Coeficiente de drenaje*
- *J = Coeficiente de transferencia de carga*
- *Ec = Módulo de elasticidad del concreto*
- *k = Módulo de reacción de la subrasante*

- **Periodo de diseño**

Es el periodo de tiempo para el que se diseña una estructura de pavimento, este periodo de diseño puede variar de 20 a 50 años, y varía de acuerdo al tipo de camino, la guía AASHTO sugiere la tabla 2.1:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1** Periodos de

Tipo de camino	Periodo de análisis (años)
Autopistas	30-50
Carreteras	20-50
Carreteras con volúmenes bajos	15-25
Caminos revestidos con bajos volúmenes	10-20

diseño  
respecto al  
tipo de  
camino.

Fuente: AASHTO (1993).

- **Tránsito de diseño**

La proyección del número de ejes que se estiman transitarán por la estructura de pavimento durante un periodo de diseño, expresado como ejes sencillos equivalentes o ESAL (Equivalent Single Axle Load) de 18,000 lbs se observa en la ecuación 2.2:

$$W_{18} = CC * CD * FC * \sum_{i=1}^n TDPA * FEC$$

Ecuación **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2**

Fuente: AASHTO (1993).

Donde:

- Factor de crecimiento:  $FC = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$

Ecuación **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3**

- Factor de equivalencia de carga FEC:  $FEC = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$

Ecuación **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4**

Por otro lado, los factores estadísticos que influyen en el comportamiento de los pavimentos de acuerdo al método AASHTO son la desviación estándar y confiabilidad.

- **Confiabilidad**

El concepto de confiabilidad en el modelo para diseño estructural. Los datos que intervienen en la ecuación de diseño presentan cierta incertidumbre dada su naturaleza, por ejemplo, es difícil pronosticar el tránsito de diseño. Para asegurar que las alternativas de diseño duren y se comporten de acuerdo a lo proyectado durante todo el periodo de diseño, se establece un nivel de confianza para el diseño (R) según el tipo de carretera. Para el desarrollo y aplicación de este concepto se supone que todos los datos varían de acuerdo a una distribución normal.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2** Desviación Normal Estándar

Confiabilidad	ZR
50	0.0
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: AASHTO (1993).

- **Índice de servicio**

El comportamiento funcional de un pavimento se refiere a la manera de cómo sirve éste al usuario, en este aspecto la calidad del viaje o confort y seguridad del mismo son las características dominantes a considerar para valorar ese servicio.

Para evaluar el comportamiento funcional de un pavimento fue desarrollado el concepto serviciabilidad – comportamiento, que asume los siguientes cinco aspectos:



Los pavimentos son construidos para la comodidad y seguridad de los usuarios.

1. El confort o calidad del viaje es competencia de la apreciación subjetiva u opinión de los usuarios.
2. La serviciabilidad puede ser expresada como el promedio de la evaluación de los usuarios.
3. Existen características físicas del pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden ser correlacionadas con las evaluaciones subjetivas; este proceso produce índices de serviciabilidad objetivos.
4. El comportamiento se representa mediante la historia de la serviciabilidad del pavimento, o sean, las variaciones de la serviciabilidad con el tiempo.
5. Para lograr estos aspectos se requeriría una encuesta a un gran número de usuarios y una escala para medir la satisfacción del servicio. La escala más generalmente usada va del cero al cinco.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el**

Índice de servicio	Calificación
0	Intransitable
1	Malo
2	Regular
3	Bueno
4	Muy bueno
5	Excelente

de servicio. **documento..3 índice**

Fuente: AASHTO (1993).

- **Módulo de ruptura**

Para el diseño de pavimentos de rígidos se considera la resistencia a flexión que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión ( $S'c$ ) o Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días. 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.

Por lo anterior, su medición se determina mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo, esta prueba está normalizada por la ASTM C78.

- **Módulo de Elasticidad**

El Módulo de Elasticidad del concreto se determina mediante la norma ASTM C469, existen dos criterios que son los más utilizados para la estimación de este módulo y son:

- $E_c = 6.75 * MR$

Ecuación ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5

- $E_c = 26.454 * MR^{0.77}$

Ecuación ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6

- **Módulo de reacción del suelo**

La capacidad portante que tiene el terreno natural y terraplén en donde se soportará el cuerpo del pavimento, el valor del módulo de reacción (k) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa conforme a la norma ASTM D1195 y D1196.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se manejen diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, por lo que se recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño estructural.

El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base.

- **Coefficiente de drenaje**

Para asignar el coeficiente de drenaje se considera el tiempo que la estructura estará expuesta a niveles de humedad cercanos al punto de saturación y la calidad del drenaje propuesto.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.** 4 Coeficiente de drenaje

Tiempo de exposición del pavimento a niveles de humedad cercanos a la saturación.				
Calidad de drenaje	Menos de 1%	1%-5%	5%-25%	Mas de 25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Buena	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Mala	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy mala	1.00-0.09	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

para pavimentos rígidos.

Fuente: AASHTO (1993).

- **Coeficiente de transferencia de carga**

La capacidad que tiene una losa de pavimento de transmitir fuerzas cortantes con losas contiguas para minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento. La eficiencia de la transferencia de carga depende de los siguientes factores:

1. Cantidad de Tráfico
2. Utilización de Pasajuntas
3. Soporte Lateral de las Losas

### **Aditivos**

En el sentido del aditivo, la norma ASTM C 494 (2013) establece como definición: *“Una sustancia química, distinta de los agregados, el cemento y el agua,*

*que interviene en una forma directa en la manufactura del concreto y sirve para modificar sus propiedades y cualidades particulares”*

Para mejorar las propiedades del pavimento Rico y Del Castillo (1992) dicen en su libro que se llegan a utilizar aditivos, con los cuales se pueden aprovechar suelos mediocres e incluso francamente inadecuados en el cimiento. Los más utilizados son el cemento y la cal, pero también se emplean escorias granuladas, cenizas volantes, ligantes hidrocarbonados fluidos, cloruro sódico y cloruro cálcico por mencionar algunos.

En los procesos de estabilización con aditivos Kraemer *et al.* (2004) argumenta que el grado de estabilización que puede alcanzarse depende fundamentalmente del tipo de suelo, del aditivo utilizado, de la cantidad añadida y muy especialmente de la ejecución.

Por su parte, el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2006) señala que las razones más comunes para usar aditivos en el concreto son: i) Incrementar la trabajabilidad, sin cambiar el contenido de agua; ii) Reducir el contenido de agua, sin cambiar la trabajabilidad; iii) Así mismo efectuar una combinación de lo anterior; iv) Ajustar el tiempo de fraguado; v) Mejorar la durabilidad potencial y reducir la permeabilidad; vi) Compensar las propiedades del agregado.

En cuanto a los aditivos de acuerdo a su efecto la *American Concrete Institute* (2013) los clasifica de la siguiente manera: i) Superfluidificantes; ii) Plastificadores; iii) Aceleradores; iv) Retardadores; v) Incluidores de aire; vi) Extractores de aire.

Existen abundantes modificadores que pueden usarse para mejorar las propiedades o las superficies de las carreteras, pero la mayoría de estos son materiales vírgenes, esos materiales son difíciles de encontrar y poco económicos cuando se usan como modificadores, dicen Adhikari *et al.* (2000)

Del mismo modo Gómez *et al.* (2016), Podzimek (2017), Bolden *et al.* (2013), Hamoush *et al.* (2011) y González *et al.* (2002) mencionaron que al agregar

elementos reciclados (incluido el EPS) a los materiales de construcción habituales, además de causar beneficios económicos y ambientales, en la mayoría de los casos, aumentaran la calidad y las propiedades mecánicas, además, la acumulación de residuos disminuirá concuerdan Kaya y Kar (2016) y Kalantar *et al.* (2010)

Los polímeros son macromoléculas que se constituyen por la unión de muchas unidades pequeñas, llamadas monómeros. Una sola molécula de polímero puede constar de cientos a un millón de monómeros, de esta manera, Coreño y Méndez (2010) caracterizan la estructura de acuerdo al ordenamiento molecular: lineal, ramificado o entrecruzado, como se ejemplifica en la figura 2.3.

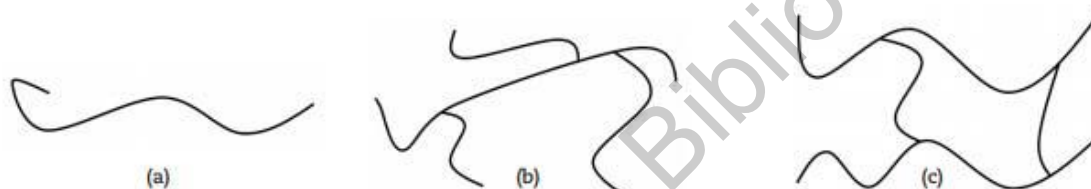


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**3 Clasificación de los polímeros a) lineal b) ramificado c) entrecruzado  
Fuente: Coreño y Méndez (2010).

Existen diferentes tipos de polímeros de acuerdo a su alto peso molecular, baja biodegradabilidad o baja disponibilidad, no obstante, Bernard (2017) los clasifica en base a sus funciones y estructuras encontradas, como se muestra en la figura 2.4.

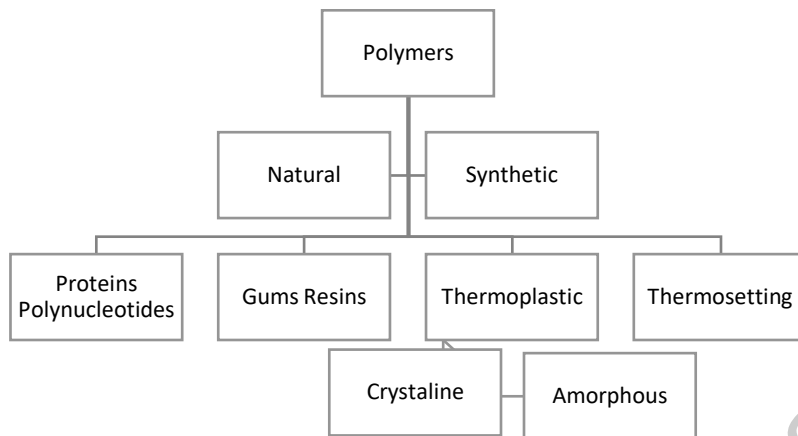


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4 Clasificación de los polímeros.  
Fuente: Bernard (2017).

### Aditivos en el concreto

De acuerdo a Boikova *et al.* (2017) un concreto mezclado con polímeros de policarboxilato modificados en cantidades razonables se caracteriza por incrementar la resistencia a la compresión en un 58-59% y un 83-91% aumento en la resistencia a flexión. Por su parte la absorción de agua en el concreto es reducida en un 40%, con esto aumentando la densidad del concreto.

Yingli *et al.* (2017) han aplicado los nano-materiales al concreto debido a su excelente rendimiento. Se emplearon dos tipos de nano-partículas, Nano-SiO<sub>2</sub> (NS) y Nano-SiC (NC) en los cuales se encontró su contenido optimo en dos y tres por ciento respectivamente, ejemplificado en las figuras 2.5 y 2.6 Los resultados arrojaron que con estas proporciones la resistencia a la flexión y la resistencia a la

compresión se pueden mejorar considerablemente como se observa en la siguiente figura.

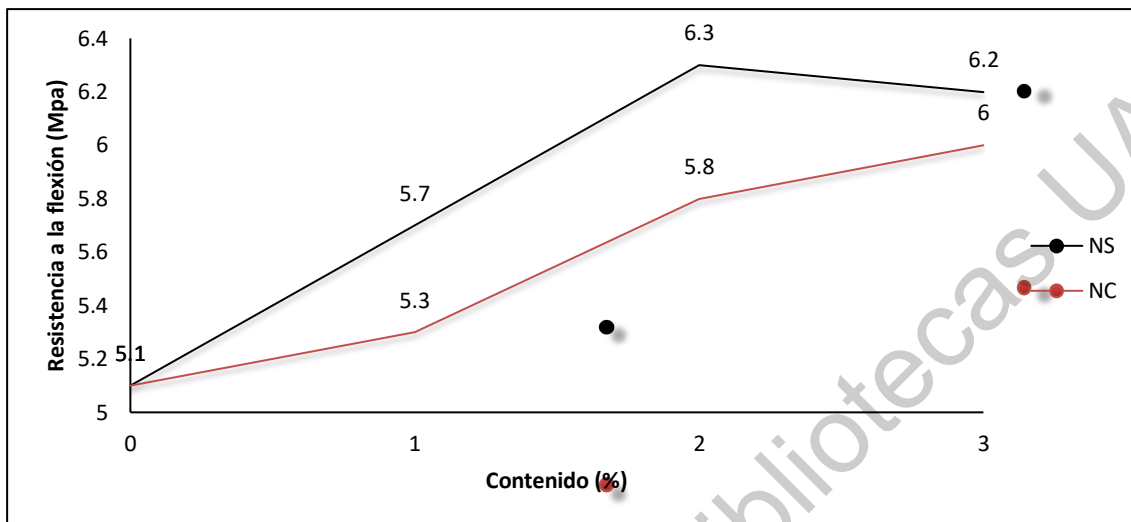


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5 Resultados de la resistencia a la flexión.  
Fuente: Yingli et al. (2017).

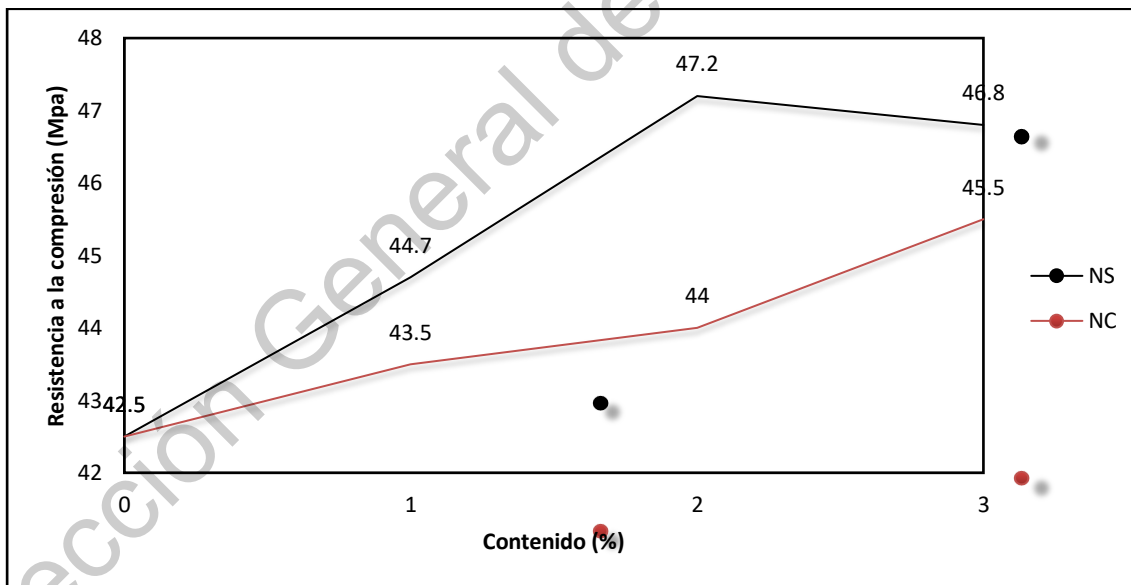


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6 Resultados de la resistencia a la compresión.  
Fuente: Yingli et al. (2017).

No obstante, existe también una investigación de Nagrockiené *et al.* (2016) en donde mezclan el concreto con un aditivo mineral en porciones de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10%. La prueba revela que la inclusión del aditivo mineral aumenta hasta en un

10% la resistencia a la compresión del concreto. En la proporción del 10% del aditivo mineral los resultados indicaron que la absorción de agua del concreto se reduce.

El aditivo mineral que más se utiliza para modificar las propiedades del concreto es la zeolita y el polvo de óxido de silicio, en la figura 2.7 se expresan los resultados de resistencia a la compresión de los dos aditivos mencionados.

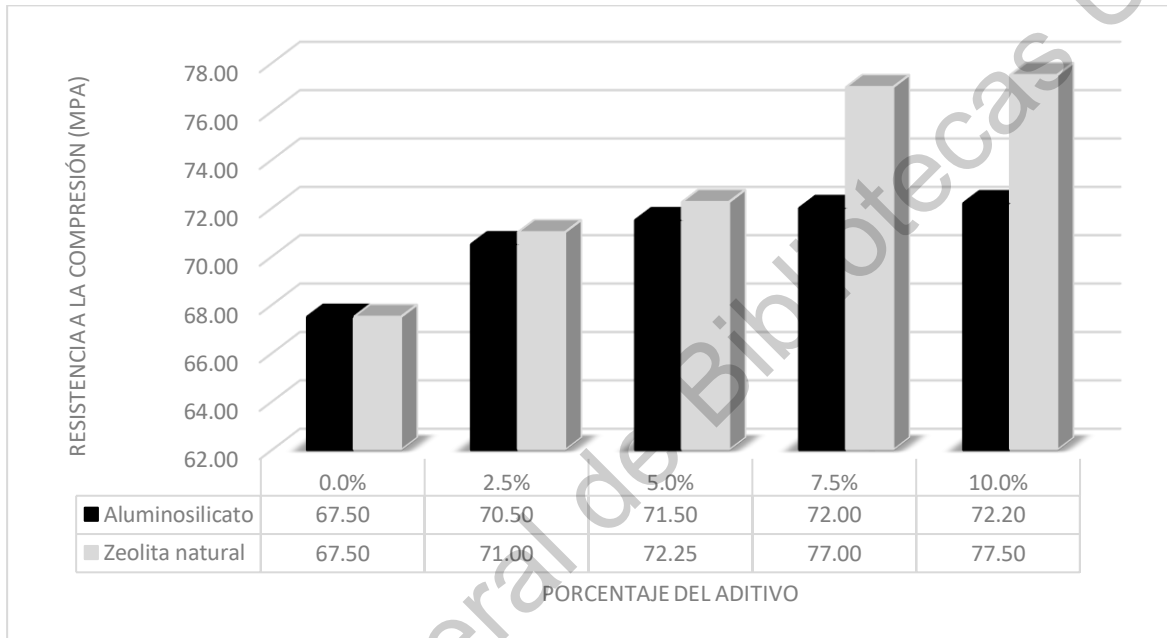


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7** Relación entre resistencia a la compresión y contenido de aditivo.  
Fuente: Nagrockiené et al. (2016)

Una investigación por Tehmina *et al.* (2014) sobre la adición de diferentes contenidos de fibras de basalto (1,2 y 3%) realizó tres tipos de mezclas, la primera fue preparada usando 100% de cemento, mientras que en las otras dos se reemplazó 10% de cemento con humo de sílice y metakaolin respectivamente.

Tanto en la figura 2.8 como en la tabla 2.5 se ve que la resistencia a la compresión óptima es en la mezcla con el 10% de Kaolin y el 2% de fibras de basalto, porque cuando se tiene un 3% de fibras de basalto ocurre una ligera baja en la resistencia.



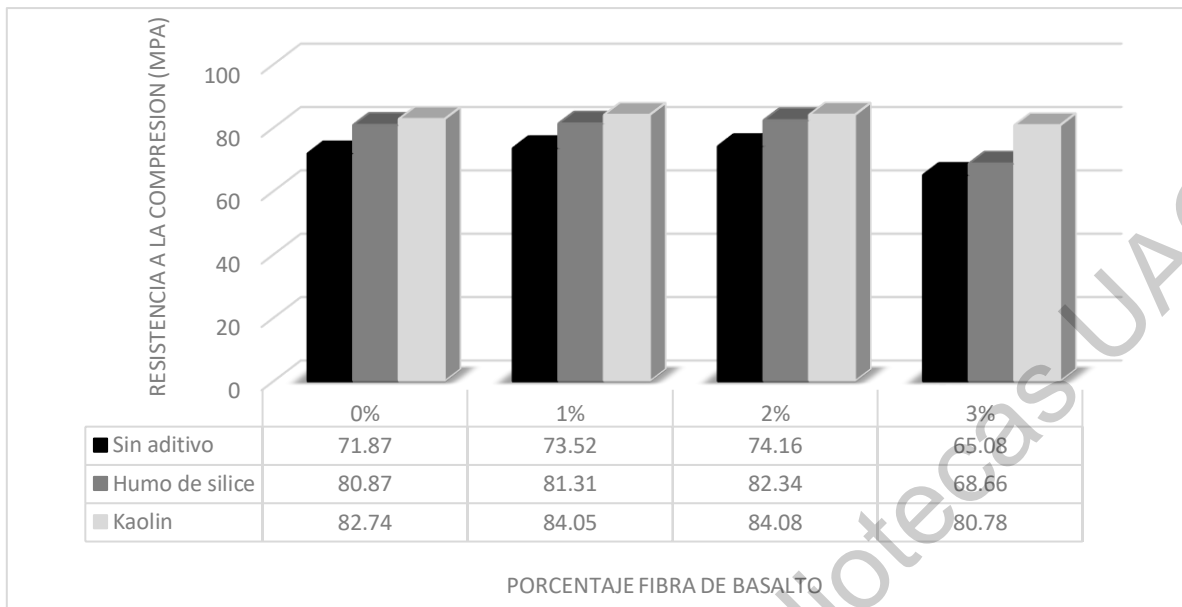


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8** Resistencia a la compresión en diferentes mezclas.  
Fuente: Tehmina et al. (2013).

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5** Variación en la resistencia a diferentes mezclas. compresión de

Concretos	Fibras de Basalto				Mpa
	0	1	2	3	
Sin aditivo Mineral	*				71.87
10% humo de sílice	*				80.87
10% Kaolin	*				82.74
Sin aditivo Mineral		*			73.52
10% humo de sílice		*			81.31
10% Kaolin		*			84.05
Sin aditivo Mineral			*		74.16
10% humo de sílice			*		82.34
10% Kaolin			*		84.08
Sin aditivo Mineral				*	65.08
10% humo de sílice				*	68.66
10% Kaolin				*	80.78

Fuente: Tehmina et al. (2013)

A las mezclas se le realizó la prueba de compresión donde 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, mientras que en la prueba de porcentaje de absorción de agua se obtuvieron la conclusión que es mayor en los especímenes con zeolita.

De las investigaciones elaboradas en el pasado de las cuales se han mencionado las más importantes para efectos de este trabajo, la realizada por Paya *et al.* (2010) respecto al nano sílice ha demostrado tener muy buena expectativa, ya que sustituyendo solo el 5% de cemento con este innovador aditivo muestra resultados satisfactorios, aun así, los mejores resultados presentados en el concreto son cuando se sustituye el 10%, a los tres días de curado.

El nano sílice es una sílice coloidal que consiste en partículas micro finas de dióxido de silicio amorfo ( $\text{SiO}_2$ ) dispersas en el agua. La superficie de las partículas es cargada por los iones de hidroxilo formados por la pérdida de protones de las moléculas de agua en los espacios entre los átomos de oxígeno de la estructura del  $\text{SiO}_2$ .

El nano sílice incrementa la resistencia a edades tempranas y también mejora las resistencias finales. Otros autores que han trabajado con los nano sílices, pero muestran inconsistencias en sus investigaciones respecto a las proporciones son Li, Zhang, Ou y Yingli *et al.* (2017) los cuales proponen que usando el 3% de nano partículas se aumenta la resistencia a la flexión y a la compresión, mientras que Li, Xiao, Li *et al.* y Byung Wan Jo *et al.* sostienen que las mejores proporciones de reemplazo deberían ser alrededor del 10% en peso.

A pesar de las diferencias que los autores encuentran, la mayoría coincide al elevar el contenido de nano sílice en el cemento Portland se logra una mejoría importante en el desarrollo de la resistencia a la compresión, debido a que las muestras presentan texturas más densas y compactas porque las nano partículas

rellenan los poros, que a su vez favorece la impermeabilidad del concreto, aunado con la formación de tobermorita secundaria que contribuye con la resistencia.

En cuanto a los aditivos minerales antes mencionados por Nagrockiené *et al.* (2016) conocemos que estos aditivos modifican y aceleran el proceso de hidratación del cemento Portland, cambian sus características físicas y su comportamiento mecánico. Existe una serie de estudios que investigan el uso de humo de sílice, carbón, zeolitas y cenizas como suplementos de concreto (aditivos puzolánicos). Las zeolitas contienen un alto contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El dióxido de sílice y la ceniza, al igual que otros materiales puzolánicos, pueden aumentar la resistencia del concreto mediante la reacción del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con las puzolanas. Las zeolitas, al igual que otros materiales puzolánicos, dan una mayor resistencia al hormigón en comparación con el cemento. Las zeolitas, sin embargo, también inducen la aparición de productos indeseables tales como álcalis y otros.

Los investigadores han encontrado que las zeolitas de diferentes modificaciones actúan como aditivos puzolánicos en el concreto, durante la hidratación del cemento aumentan las fases de gel CSH y CAH, que aumentan la resistencia de las composiciones de cemento Portland a la corrosión de ácidos y sulfatos y aumentan su durabilidad.

Tanto el humo de sílice, fibras de basalto y metakaolin han sido investigados por Tehmina *et al.* (2013), este último, se ha estado investigando como material puzolánico en las últimas décadas, por científicos de todo el mundo, debido a su composición química,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ , y a su estructura cristalina amorfa.

El MK es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de  $500^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$ ; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina al romper los enlaces de Vander Waals (OH) que unen los tetraedros de sílice,  $\text{SiO}_2$ , y los octaedros de alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , es

decir, al perder el agua combinada por la acción térmica se destruye la estructura cristalina del Kaolin.

Mientras que las fibras de basalto son producidas cuando el basalto es extraído de cantera es molido, lavado y derretido en los hornos.

La micro sílice o humo de sílice suele definirse como una “súper puzolana” por las propiedades que proporciona al cemento. Es un mineral compuesto de dióxido de silicio amorfo y ultra fino, que resulta del proceso de la obtención de ferro silicio o silicatos, involucrando la reducción en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C.

La micro sílice debido a su finura, sus partículas actúan como un filler, llenando los espacios vacíos en la pasta haciendo que el concreto tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad a la vez que brinda más fluidez a la mezcla.

Además, ayuda a reducir la exudación de agua en la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad, y a su vez incrementa la durabilidad. En cuanto a la resistencia, determina aumentos significativos desde 20 a 50%, obteniendo mayores beneficios. Otra de las propiedades que brinda el uso de micro sílice como adición al incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, reduce casi hasta eliminar una probable reacción álcali sílice. Todo esto se traduce en mayor durabilidad en los elementos en los cuales se emplea esta adición y que están sometidos a climas extremos como hielo-deshielo.

Las micro sílices reaccionan, dentro de los primeros 28 días con el hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento y mejoran la resistencia a la compresión del mortero. Además, modifican la distribución por tamaño de los poros por reacción con el hidróxido de calcio formado y produce una estructura de poros más discontinua lo que lo hace más impermeable.

## **Aditivos poliméricos**

A pesar de que no existe demasiada literatura respecto al tema, se encontraron investigaciones de los últimos años de las cuales se pudo hacer referencia, y con ello indagar un poco más para este trabajo acerca del poliestireno expandido (EPS).

Horvath (1994) establece que el poliestireno expandido es el material geofam más utilizado en la industria de la construcción, contando ya con 30 años de experiencia en aplicaciones geotécnicas, Bajdur *et al.* (2002), indica que el reciclaje químico es otra de las funciones que tiene el EPS, con el fin de añadirlo en los concretos, por ejemplo.

Además de estos usos, tiene muchas otras ventajas, como lo son: estar disponible en todo el mundo, es el material polimérico menos costoso por un margen significativo y no libera formaldehído (gas tóxico) después de años de su fabricación como casi todos los demás materiales geofam.

Kan y Demirboga (2009) explican que la utilización de residuos de poliestireno expandido en la tecnología del concreto, cada vez es más común. Para su investigación decidieron utilizarlo como agregado, desarrollando un nuevo proceso de reciclado usando un tratamiento térmico. El volumen del desecho de EPS se vio reducido hasta 20 veces de su tamaño original.

Babu *et al.* (2005) coinciden en utilizar el poliestireno expandido (EPS) como agregado, ya sea en morteros o en concretos, también puede ser usado tanto estructural como no estructural, por lo tanto, los autores de esta investigación estudiaron las propiedades físicas del concreto con el agregado de EPS.

De igual forma, Ravindrarah y Tuck (1994) utilizaron un concreto que contiene perlas de poliestireno expandido (EPS) con el fin de utilizarlo como

agregado fino, al haber realizado las pruebas de compresión, su resistencia se vio afectada y disminuyo considerablemente.

El poliestireno expandido puede ser fácilmente incorporado con diferentes contenidos en el concreto para producir un concreto ligero exponen Chen y Liu (2004), también con una amplia gama de densidades dice Ohama (1994) y hasta utilizado como material para una capa de subbase en pavimentos argumentan Chen y Liu (2007)

Una solución de estireno se preparó para disolver desechos de EPS en una concentración de 40%., posteriormente se hicieron morteros con diversos contenidos de este agente, las pruebas que se realizaron, señalan Choi y Ohama (2004), fueron resistencia la flexión, resistencia a la compresión y resistencia al agua caliente. Los resultados fueron satisfactorios para la resistencia a la compresión y también al agua caliente, pero la vida útil de los morteros y la resistencia a la flexión se vieron disminuidas.

Por último, Mohajerani *et al.* (2017) al igual que otros autores, aplico el poliestireno expandido (EPS) en los pavimentos de concreto o pavimentos rígidos, de manera que lo utilizo como relleno liviano, aislante térmico y amortiguador de vibraciones, en el que consiguió resultados aprobatorios.

## METODOLOGÍA

Esta investigación tiene como propósito mejorar las propiedades mecánicas de un pavimento rígido al utilizar aditivos líquidos, lo cual lograra igualar o superar las propiedades mecánicas de un pavimento de concreto convencional. El siguiente capítulo muestra la metodología empleada de manera detallada para llevar a cabo este objetivo, se presentan las técnicas y procedimientos en el orden establecido. Por lo tanto, se realiza el siguiente esquema:



Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9** Metodología aplicada.

Fuente: Elaboración propia.

## **Selección de materiales**

El concreto es un material compuesto por un material aglutinante (cemento y agua), agregados y, eventualmente, aditivos. Los agregados son materiales triturados, como grava y arena, que sirven para reforzar la mezcla cementante del concreto. Una etapa muy importante en el diseño de mezcla del concreto es el análisis en laboratorio de las características del agregado pétreo, ya que con la evaluación de los agregados conoceremos el comportamiento mecánico final del concreto. En esta investigación se le agregara un aditivo al concreto, por lo que en la primera etapa se debe seleccionar y caracterizar los materiales a utilizar: agregados finos y agregados gruesos propios de la región, cemento portland y el aditivo a utilizar.

### **Agregados pétreos**

El agregado grueso usado en este trabajo de investigación es del banco de materiales “Corporativo AG” ubicado en La Cañada, Querétaro. Se tomaron 12 costales (aproximadamente 400 kilogramos) de agregado grueso de tamaño máximo de 1 ½”, mientras que el agregado fino fue muestreado del banco de materiales “UPA” que se encuentra en Carretera 200, municipio del Marques, comunidad rural Saldarriaga, en la figura 3.2 se observa las instalaciones del banco “Corporativo AG” y en la figura 3.3 se muestra el agregado fino.





Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**10 Muestreo del agregado grueso del banco de materiales.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**11 Agregado fino.  
Fuente: Elaboración propia.

Los agregados fueron muestreados de acuerdo a la Norma Mexicana NMX C-030-ONNCCE-2004 para posteriormente llevarlos al laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UAQ donde

se evaluaron las características del agregado seleccionado, a estos materiales se le realizaron las siguientes pruebas:

- Densidad específica y Absorción
- Granulometría
- Módulo de finura
- Peso volumétrico seco suelto y compacto
- Equivalente de arena
- Límites de consistencia
- Desgaste de Los Ángeles
- Revenimiento

Se tomó la decisión de realizar las pruebas anteriores ya que son las necesarias para establecer juicios de aceptación o rechazo de los agregados empleados en el diseño de mezcla, esto tomando en cuenta la normativa mexicana para los pavimentos rígidos

Para ambos tipos de agregados, se hace una reducción o cuarteo de las muestras obtenidas en campo al tamaño requerido, para así también mantenerlas homogéneas y se utilice una muestra representativa de todo el material. Para este procedimiento, se consultó la norma NMX – C – 170 – ONNCCE - 1997.

El material tiene q ser paleado de un lugar a otro en varias ocasiones sobre una superficie limpia, firme y nivelada para que no haya perdida de material ni adición a la muestra de material extraño. Una vez terminado este proceso, se coloca la muestra en una pila cónica, donde se deposite cada fracción de material en la parte superior de la pila, como se ve en la figura 3.4 y posteriormente 3.5.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..12 Reducción del material grueso.

Fuente: Elaboración propia.

Después, se aplanan la pila cuidadosamente con la pala, para uniformizar el espesor y el diámetro. El diámetro debe ser aproximadamente cuatro u ocho veces el espesor. Posteriormente, se divide la masa en cuatro partes iguales con la ayuda de una regla, incluyendo el material más fino ayudados de una brocha.

Se recoge dos cuarteos opuestos y se repite el procedimiento hasta que la muestra sea reducida al tamaño deseado.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..13 Cuarteo de una porción del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

- Densidad específica y absorción

La norma NMX – C – 164 – ONNCCE – 2014 tiene como propósito la determinación de la densidad relativa aparente y la absorción del agregado fino en la condición saturada superficialmente seca, ver figura 3.6 y 3.7 del agregado grueso, así como el método de prueba para la determinación de la masa específica y la absorción de agua del agregado grueso.



Figura 3.6 Condición saturada superficialmente seca del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

Esta prueba tiene una influencia directa en el diseño de mezcla, ya que los materiales podrían ser porosos y débiles así que es determinante para que el material sea aceptado o rechazado.

La absorción de los agregados es de suma importancia pues indica la cantidad de agua en la dosificación, se obtiene generalmente después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas, cuando ésta termina se procede a secar

superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra obtener el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material.



Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**15 Condición saturada superficialmente seca del agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia.

- Granulometría

El objetivo de una granulometría es determinar la distribución de tamaños, usualmente se expresa en porcentajes acumulados de mayor a menor, basada en la norma NMX-C-077-ONNCCE. Consiste en colocar una muestra en la malla teniendo cuidado de que todas las partículas tengan oportunidad de entrar en las aberturas durante toda la operación y agitar la malla manualmente o con un medio mecánico por un periodo de tiempo suficiente donde se realice el cribado necesario, como se indica en la figura 3.8 y 3.9.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..16 Cribado de la fracción fina.  
Fuente: Elaboración propia

El material retenido en cada malla se pesa en una balanza, y se repite el procedimiento una vez más para la siguiente malla requerida. La suma de las masas de todos los materiales retenidos deberá ser muy próxima a la masa total de la muestra original, teniendo un parámetro de falla de 0.3%.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..17 Tamizado de la



mallas No. 4  
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente es posible hacer una curva granulométrica, con los resultados obtenidos de la prueba, con esto se puede efectuar una clasificación de suelos. Para el diseño de mezcla es importante tener agregados bien graduados ya que esto generara la resistencia máxima posible con una porción mínima de cemento.

- Módulo de finura

El módulo de finura se utiliza como un índice de la fineza de un agregado, cuanto más alto sea este más gruesa será la partícula. Este módulo se obtiene sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie de mallas específicas.

De acuerdo a la normativa el módulo de finura no será menor a dos punto tres (2.3), ni mayor a tres punto uno (3.1) con una tolerancia de dos décimas (0.2) en más o en menos con respecto al módulo de finura empleado en el diseño del proporcionamiento del concreto hidráulico.

- Peso volumétrico seco suelto y compacto

Basado en la Norma Mexicana NMX-C-073-ONNCCE, es una propiedad fundamental donde su importancia radica en el control que tiene sobre el peso unitario del concreto. Se define como el peso de los fragmentos del agregado que llenarían una unidad de volumen. Puede ser seco suelto, en el cual las partículas se acomodan por si mismas o seco compacto a través de varillado se busca reducir espacios entre las partículas.

La realización de la prueba consiste en llenar el molde con 3 capas de igual volumen de material, compactando con 25 golpes en caso de que sea peso volumétrico seco compacto (PVSC), posteriormente se enrasa con una regla metálica o un enrasador en caso de que sea la fracción fina o simplemente quitando y poniendo partículas en caso de que sea el agregado grueso, para terminar, se determina la masa total del recipiente con el material.

- Equivalente de arena

Determina la calidad del agregado fino (arena) para conocer la cantidad de arcilla contenida que pasan por la malla no. 4. Se fundamenta en la norma NMX-C-416-ONNCCE, resulta indispensable conocer la cantidad de arcilla en los materiales para pavimentos, ya que en la mayoría de los casos las arcillas perjudican la estabilidad de los materiales y disminuye su resistencia natural.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..18 Parte del procedimiento en la prueba equivalente de arena.  
Fuente: Elaboración propia

- Límites de consistencia

El objetivo de esta prueba es conocer las características de plasticidad, cuyos resultados se utilizan para conocer la clasificación de suelos. Basada en la norma mexicana NMX-C-416-ONNCCE, consiste en determinar el límite líquido (contenido de agua) considerado la frontera entre los estados semilíquido y plástico. El límite plástico se trata de la frontera entre los estados plásticos y semisólido, mientras que el índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.



Esta prueba puede realizarse mediante la copa de casa grande o también por un método alternativo: el penetrómetro cónico, también llamado cono inglés. El procedimiento inicial es de la misma manera, se prepara el material cribándolo por la malla no. 40 y haberlo saturado durante 24 hrs antes del ensayo, después tomar una muestra de aproximadamente 300 grs para mezclarlo con una espátula durante 10 minutos.

Para el cono inglés, se coloca una porción de suelo en un recipiente metálico teniendo cuidado que no quede aire atrapado, enrasándolo posteriormente, La muestra se coloca bajo el cono inglés cuidadosamente de manera que solamente la punta del mismo toque la superficie del material. Se suelta el cono por un periodo de 5 s y se anota la lectura de la penetración. Si la lectura se considera útil, se toma 10 g de suelo del área penetrada del cono.



Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**19 Prueba del límite líquido con el cono inglés.  
Fuente: Elaboración propia

Este proceso se repite al menos en tres ocasiones, usando la misma muestra de suelo, pero variando su contenido de humedad. Es recomendable ensayar primero

la muestra de suelo de menor contenido de humedad para que se pueda ir aumentando el agua y obtener mayores valores de penetración. Tratando de que los valores estén entre 15 mm y 25 mm, para que el valor de 20 mm sea el valor de límite líquido.

Cabe destacar que no se encontró norma mexicana para este procedimiento, por lo que se basaron en las normas BS 1377 o NTC 4630

- Desgaste por abrasión o prueba de Los Ángeles

Prueba que respalda en la norma NMX-C-196-ONNCCE, determina la dureza de los materiales pétreos que se emplean en las mezclas de concreto, sirve para estimar su efecto por ejemplo en la resistencia estructural, es un indicador de la calidad que tiene el agregado.

El ensayo se ejecuta con la máquina de Los Ángeles, consiste en el impacto y abrasión que se produce en un tambor de acero giratorio que contiene un número especificado de esferas de acero dependiendo de la granulometría del material.

Terminando el número de revoluciones se recoge el contenido y se criba para medir la degradación del agregado.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..20 Preparación de la prueba de desgaste de los Ángeles.  
Fuente: Elaboración propia.

- Revenimiento

El concreto recién mezclado debe ser capaz de ser moldeado, por lo tanto, el revenimiento es la medida de la consistencia del concreto basado en la norma mexicana NMX-C-472-ONNCCE. El incremento o disminución en el contenido de agua es directamente proporcional al aumento o disminución en el revenimiento del concreto, y muchas veces también en su resistencia. El revenimiento recomendado para un pavimento rígido se encuentra entre los 2.5 centímetros hasta los 7.5 centímetros.

### Cemento y agua

El cemento a utilizar para la elaboración del concreto es un cemento portland “que cumpla con los estándares de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

El agua que se emplee en la fabricación del concreto deberá cumplir con la norma NMX- C -122-ONNCCE, esta norma establece una clasificación de diversos tipos de aguas existentes que con sus efectos y limitaciones no pueden ser utilizadas para concretos, como se puede observar en la tabla 3.1.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.** 6 Tipos de agua y sus efectos en el concreto.

Aguas fuertemente salinas	Interrumpe las reacciones del fraguado del cemento en el curado, disolución de los componentes calcicos del concreto (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Agua de mar	Un concreto hecho con agua de mar puede tener una resistencia temprana mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores pueden ser inferiores. El agua de mar no es adecuada para producir concretos reforzado con acero y no deberá usarse en concretos presforzados debido al riesgo de corrosión del refuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos Kosmatka y Panarese, 1992). Produce eflorescencia. Incrementa la posibilidad de generar corrosión del acero de refuerzo(NMX-C122-ONNCCE-2004).

Aguas sulfatadas	Son agresivas para concretos, fabricados con cemento Portland (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas cloruradas	Produce una alta disolución de la cal (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas ácidas	Las aguas acidas no tienen un efecto adverso en la resistencia, sin embargo, pueden ocasionar problemas de manejo y se deben evitar en la medida posible (Kosmatka y Panarese, 1992). Disolución rápida de los compuestos del cemento (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas magnesianas	Tienen a fijar la cal, formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble. En la mezcla, inhibe el proceso de fraguado del cemento (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas alcalinas	No afectan en gran medida a la resistencia, en mayores concentraciones pueden reducir la resistencia al concreto y tiene la posibilidad de una mayor reacción álcali-agregado (Kosmatka y Panarese, 1992). Produce acciones nocivas para cementos diferentes al aluminoso (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas recicladas	Es permitido reusar el agua de enjuague como el agua en concreto si satisface los límites de la normativa (Kosmatka y Panarese, 1992). El concreto puede atribuir los defectos propios del exceso de finos (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas de desperdicios industriales	El uso de estas aguas como agua de mezclado, reduce la resistencia a la compresión entre un 10% a 15%. Las aguas de desperdicios industriales pueden contraer impurezas nocivas, lo recomendable es realizar pruebas a cualquier agua de desperdicio (Kosmatka y Panarese, 1992).
Aguas negras	Las aguas negras típicas pueden contener materia orgánica. Estas aguas si se realiza un buen tratamiento, la concentración se reduce y de igual forma el efecto en la resistencia (Kosmatka y Panarese, 1992). Efectos imprevisibles (NMX-C-122-ONNCCE-2004).

Fuente: NMX – C – 212 – ONNCCE - 2004

## **Poliestireno expandido**

Por último, el poliestireno expandido (EPS), conocido comúnmente en México como unigel fue obtenido de manera reciclada, ver figura 3.13.

Usualmente los electrodomésticos y algunos otros productos son empaquetados con este material, por lo tanto, no fue difícil conseguir gran cantidad de este producto incluso cuando es extremadamente ligero.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..21 Poliestireno expandido sólido.

Fuente: Elaboración propia.

## **Diseño de mezclas y aditivo**

Comenzamos identificando las propiedades físicas y mecánicas de los materiales (arena, grava, cemento, aditivo), ya que con el tiempo se ha indagado en los diseños de mezcla para no caer con la rutina de utilizar “recetas” dosificadas solo por el volumen, la mezcla depende de las características de los agregados a utilizar.

Se utilizó el método del *American Concrete Institute*, el cual es un método de dosificación para el diseño de mezclas de concreto, basado en medir los materiales en peso y volumen.

Después de tener las propiedades de los agregados, con ayuda en las tablas que nos da el ACI, la dosificación se realiza de acuerdo a la elección de las siguientes características:

1. Resistencia del concreto ( $f'c$ )
2. Revenimiento
3. Tamaño máximo de la grava
4. Concreto con/sin aire incluido
5. Seleccionar la cantidad de agua de acuerdo a la tabla.
6. Escoger la relación agua/cemento para tu resistencia elegida
7. Cálculo del cemento en base a la información obtenida de los pasos anteriores.
8. Estimar la cantidad de agregado grueso de acuerdo a la tabla proporcionada, con base a el módulo de finura del agregado fino.
9. Por último, conociendo ya los consumos de agua, cemento y grava, se completa el metro cubico con el material restante (agregado fino).

Por otra parte, para el poliestireno expandido se implementó un proceso de corte y trituración, esto para establecer un tamaño homogéneo y demás eliminar las impurezas o fracciones no deseadas, como se muestra en la figura 3.14. El EPS consiste en una forma líquida, para que sea capaz de actuar como un aglutinante en la formulación polimérica del concreto.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..22 Partículas homogéneas de EPS.  
Fuente: Elaboración propia.

### **Fabricación y control de especímenes.**

Experimentalmente se realizaron cubos de mortero (5cm x 5cm x 5cm) fundamentado en la norma mexicana NMX-061, con el propósito de analizar el comportamiento del aditivo con el cemento, se realizaron 3 especímenes por edad (7 y 28 días) y se eligieron las cantidades de 1,3,5,7 y 10%, basados en el peso total del espécimen, además de estas muestras, se hicieron otros ejemplares sustituyendo el cemento con los porcentajes ya mencionados.

Las mezclas de mortero con las resistencias más altas, fueron elegidas para hacer 3 especímenes cilíndricos de concreto por edad (15cm x 30cm) para resistencia a la compresión, elaborados y curados según la norma mexicana NMX-C-160-ONNCCE, la cual indica que se harán mediante el llenado y compactado de tres capas de concreto de igual espesor, varillando 25 veces por capa (para cilindros de estas dimensiones) y posteriormente golpeando ligeramente con un mazo de hule las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla. Al terminar la compactación, se enrasa la superficie del concreto para que este a nivel de las orillas del molde y no tenga depresiones o elevaciones.

De igual forma se realizaron vigas de concreto (15cm x 15cm x 50cm) para la resistencia a la flexión fundamentadas bajo la misma norma, siguiendo el procedimiento ya establecido, con la diferencia que el varillado se realiza en dos capas y se efectúa un golpe por cada 14cm<sup>2</sup> de la superficie superior del espécimen prismático.

Para ambos especímenes (cilíndricos y prismáticos) es indispensable al terminar el acabado evitar la evaporación del agua, cubriéndolos de preferencia con una placa no absorbente o con una tela de plástico impermeable. Los especímenes son descimbrados no antes de 20 horas ni después de 48 horas de su elaboración. El curado debe de ser a una temperatura de 23°C con diferencia de 3°C ya sea más o menos.

### **Análisis de propiedades mecánicas de los especímenes**

#### **Resistencia a la compresión**

Es la medida más común de desempeño que se emplea en la construcción con concreto, ensayo técnico que determina la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión, consiste en ensayar especímenes representativos del concreto que se prueban hasta la falla a la velocidad de carga de 25t/min, por esta razón se le considera como ensaye destructivo. Estos especímenes se elaboran de forma cilíndrica, tomando como base que la altura del cilindro sea dos veces el diámetro todo esto basándonos en la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE, la cual establece la determinación del esfuerzo de compresión (en especímenes mayores de 800kg/m<sup>3</sup>) de diferentes a elegir, dividiéndose la carga máxima obtenida por el área de la cara axial del espécimen (figura 3.15)





Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..23 Prueba de resistencia a la compresión.  
Fuente: Elaboración propia.

En la práctica se utilizan cilindros de 150 x 300mm, como medida estándar; dado que el espécimen se somete a una carga axial, sus bases deben de ser paralelas y perpendiculares al eje de la carga axial.

Para que se realice el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

Ecuación 3.1

Donde:

- $f_c$ : esfuerzo máximo a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)
- $P$ : carga máxima (kg)
- $A$ : área de la sección transversal (cm<sup>2</sup>)

Cemex (2012) argumenta que pueden presentarse las siguientes fallas que se presentan en la figura 3.16:

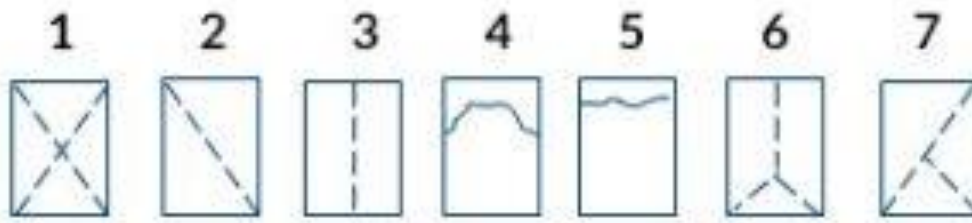


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..24 Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión.

Fuente: Cemex (2012).

1. Se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado.

2. Se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en límite de tolerancia especificada o excediendo esta.

3. Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia del material de cabeceo: también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.

4. En especímenes que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencias en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.

5. Se observa cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga, por deficiencias en el material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.

6. Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias del material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.

7. Se observa cuando las caras de aplicación de carga del espécimen se desvían ligeramente de las tolerancias de paralelismo establecidas, o por ligeras desviaciones en el centro del espécimen para la aplicación de carga.

## Resistencia a la flexión

El módulo de ruptura es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga.

La resistencia a la flexión del concreto es una medida de la resistencia a la tracción del concreto, es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas (15cm x 15cm) de sección transversal y con un claro de como mínimo tres veces el espeso (45cm), mostrado en la figura 3.17.

La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR) en kilogramo sobre metro cuadrado y está basada en la norma mexicana vigente NMX-C-191-ONNCE. Este módulo es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..25 Prueba de módulo de ruptura.

Fuente: Elaboración propia

La prueba consiste en aplicar cargas en los tercios del claro de la viga, de tal modo que las fuerzas sean perpendiculares a las caras horizontales del espécimen, se distribuyan y platiquen uniformemente en todo lo ancho. La carga se aplica a velocidad uniforme de tal manera que no exceda los 10 kgf/cm<sup>2</sup> permitiéndose velocidades mayores antes del 50% de la carga estimada de ruptura. Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{PxL}{Bxd^2}$$

**Ecuación** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7

Donde:

- *R*: es el módulo de ruptura (kg/cm<sup>2</sup>)
- *P*: carga máxima (kg)
- *L*: es la distancia entre apoyos (cm)
- *b*: es el ancho promedio del espécimen (cm)
- *d*: es el peralte promedio del espécimen (cm)

Para terminar, 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. Mientras que el valor para autopistas y carreteras es de 682.7 psi. La tabla 3.2 sugiere algunas resistencias utilizadas normalmente en los pavimentos rígidos, sin la presencia de algún aditivo.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7 Módulo de ruptura recomendado.

Tipo de Pavimento	kg/cm <sup>2</sup>	psi
Autopistas	48	682.7
Carreteras	48	682.7
Zonas Industriales	45	640.1

Urbanas principales	45	640.1
Urbanas secundarias	42	597.4

Fuente: AASHTO (1993).

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan en el siguiente apartado corresponden a un valor promedio después de hacer los ensayos de laboratorio en al menos un par de ocasiones.

### Selección de materiales

#### Agregado pétreo

A continuación, se presenta a manera de resumen la tabla 4.1, donde se muestran los agregados empleados en esta investigación, así como los resultados de las pruebas a lo que fueron sometidos. Las pruebas de laboratorio fueron efectuadas bajo las consideraciones de las normas enseguida citadas, referente a los agregados para concreto hidráulico.

**Tabla 4.1** Caracterización de agregados pétreos para concreto hidráulico.

Prueba	Agregado fino	Agregado grueso	Norma
Densidad específica	1.90	2.81	NMX-C-165-ONNCCE
Absorción	2.5%	1.1%	NMX-C-165-ONNCCE
Módulo de finura	2.58	---	NMX-C-111-ONNCCE
PVSS	1002.09 kg/m <sup>3</sup>	1486.00 kg/m <sup>3</sup>	NMX-C-073-ONNCCE
PVSC	1102.30 kg/m <sup>3</sup>	1604.20 kg/m <sup>3</sup>	NMX-C-073-ONNCCE
Equivalente de arena	78.57%	---	NMX-C-416-ONNCCE
Limite Líquido	38.9%	---	NTC-4630
Índice Plástico	NP	---	NTC-4630
Desgaste de Los Ángeles	---	22%	NMX-C-196-ONNCCE

materiales.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados, se identifica que tanto el agregado grueso como el agregado fino son aptos para la elaboración de una mezcla de concreto, de igual

manera, estas características se tomaran en cuenta en el diseño de la mezcla para de esta manera evitar perdida de resistencia en el concreto.

Por su parte, se muestra la granulometría de los agregados y su distribución de tamaños en las figuras 4.1 y 4.2. Se puede concluir que ambos agregados se encuentran entre los límites que establece la normativa para elaborar pavimentos de concreto hidráulico y por lo tanto son aptos para esta investigación.

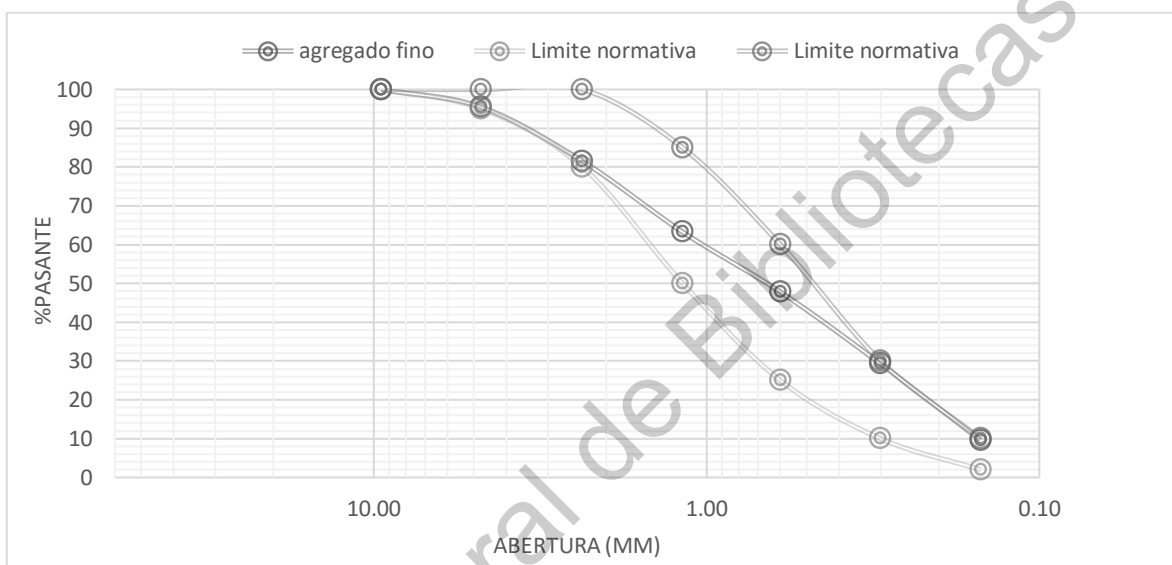


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..26 Análisis granulométrico del agregado fino.  
Fuente: Elaboración propia

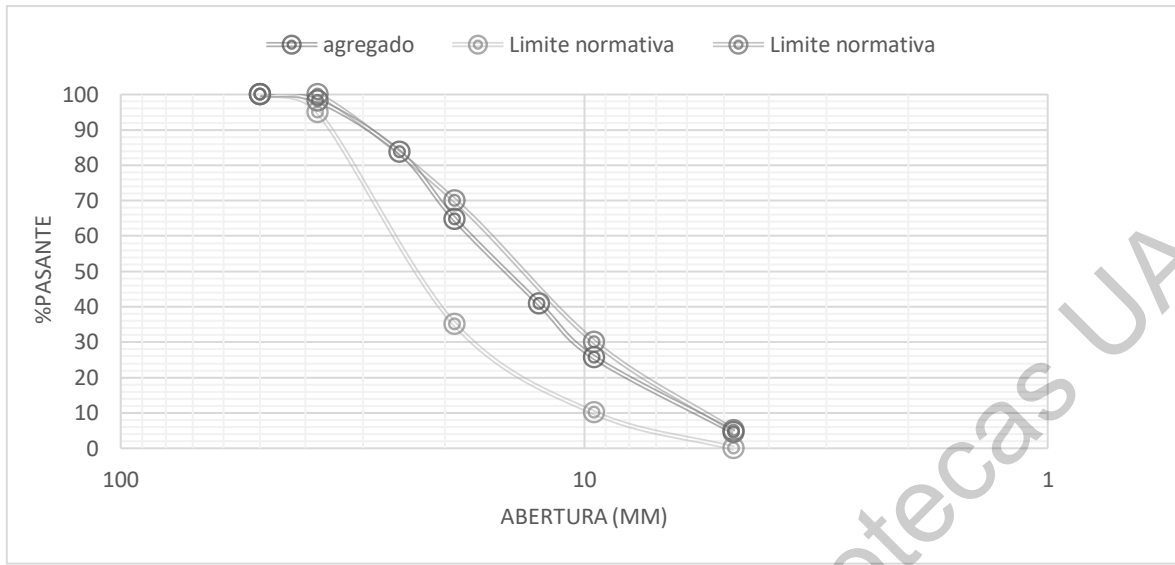


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..27 Análisis granulométrico del agregado grueso.  
Fuente: Elaboración propia

### Cemento y agua

El cemento utilizado en este proyecto de investigación corresponde a un cemento portland marca “Cruz Azul” Cemento Portland Compuesto 30R, teniendo una resistencia rápida.

Conforme a la norma mexicana, el agua debe ser potable, y, por lo tanto, estar libre de materiales perjudiciales tales como aceites, grasas, materia orgánica, etc. En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano.

### Poliestireno expandido

El material utilizado para el desarrollo del aditivo polimérico fue poliestireno expandido (EPS), Beju y Mandal (2017) lo definen como un material geo sintético de plástico celular rígido super ligero, este polímero fue obtenido de manera reciclada, como ya se había mencionado, tiene una densidad de  $29.4 \text{ kg/m}^3$  y una composición como se muestra en la siguiente tabla 4.2



Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**9 Análisis del poliestireno expandido (EPS).

Elemento	Símbolo	Porcentaje (%)
Carbono	C	84.22
Hidrogeno	H	7.12
Nitrógeno	N	0.18
Azufre	S	0.22

Fuente: Elaboración propia

### Diseño de mezclas y aditivo

La resistencia mínima de un pavimento de altas especificaciones suele ser de 48 kg/cm<sup>2</sup> en su módulo de ruptura, con un revenimiento aproximadamente de entre 2.5cm y 7.5cm, sin embargo, para esta investigación se eligió una resistencia menor, con la finalidad de que la mezcla de concreto fuera mas fluida y con buena trabajabilidad. Este aspecto no afecto de ninguna manera ya que el propósito es tener un concreto base o de control, con el cual establecer un parámetro para poder comparar la mezcla que contiene el aditivo.

La disolución del poliestireno expandido (EPS) se realizó con un agitador mecánico durante 25 minutos a una temperatura por debajo de los 16°C. (figura 4.3), la proporción utilizada fue de 30% EPS y 70% solventes, basado en la consistencia del aditivo polimérico, ya que con cantidades mayores de EPS la mezcla carecía de cohesión.

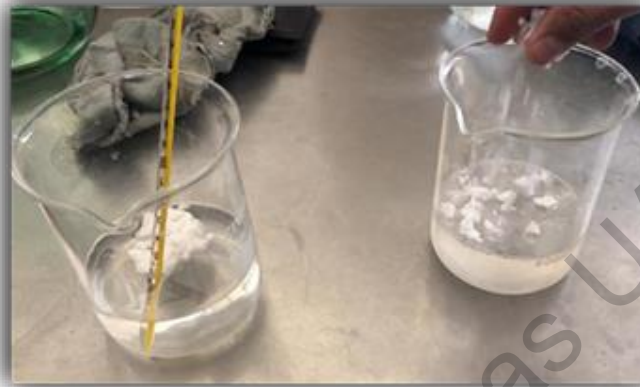
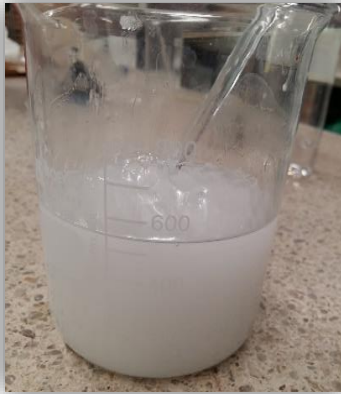


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..28 EPS de forma líquida.

Fuente: Elaboración propia.

### Fabricación y control de especímenes

Como se explicó en el capítulo anterior se realizaron primeramente muestras de mortero a la edad de 7 y 28 días, con el fin de experimentar la reacción del aditivo. La siguiente tabla 4.3 nos explica los porcentajes utilizados en la fabricación de estos (figura 4.4). El espécimen nombrado C-M (Cubo de mortero) hace referencia a la muestra de control, es decir, el mortero base para servir como parámetro en la experimentación. Las muestras llamadas C-A (cubo con aditivo), ver figura 4.5, indican el porcentaje de aditivo que se le adiciono, por ejemplo, C-A3 nos indica que tiene un 3% de poliestireno expandido (EPS) de forma líquida. Para finalizar, los ejemplares llamados C-S (cubo con sustitución) nos expone que se sustituyó un porcentaje de cemento con el aditivo de EPS.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10 Especímenes de mortero con sus proporciones.

Clave	Mezcla	Cemento (%)	EPS (%)
-------	--------	-------------	---------

C-M	Control	100	0
C-A1	Adición	100	1
C-A3	Adición	100	3
C-A5	Adición	100	5
C-A7	Adición	100	7
C-A10	Adición	100	10
C-S3	Sustitución	97	3
C-S5	Sustitución	95	5
C-S7	Sustitución	93	7
C-S10	Sustitución	90	10

Fuente: Elaboración propia



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..29 Preparación de un cubo de mortero con EPS líquido.

Fuente: Elaboración propia.



Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..30** Cubo de mortero con EPS líquido.  
Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar con la fabricación de especímenes en ejemplares de concreto, se hicieron 3 porcentajes, como se muestra en la tabla 4.4, además de las muestras de control, para probarlos a la edad de 3, 7 y 28 días tanto a la resistencia a la compresión, así como a la prueba de resistencia a la flexión o módulo de ruptura.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..11** Diferentes

Cilindro	Viga	Mezcla	Cemento (%)	EPS (%)
C-M	V-M	Control	100	0
C-A1	V-A1	Adición	100	1
C-A5	V-A5	Adición	100	5
C-S5	V-S5	Sustitución	95	5

especímenes de concreto con sus proporciones.

Fuente: Elaboración propia

## Análisis de las propiedades mecánicas

### Resistencia a la compresión

En primer lugar, se muestran a continuación (tabla 4.5 y figura 4.6) los resultados de la prueba a compresión de los cubos de mortero. Posteriormente se seleccionó las tres proporciones donde los resultados fueron positivos, para hacer especímenes de concreto.

Especímen	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		Absorción (%)
	7 días	28 días	
C-M	127.58	187.51	6.65

C-A1	100.33	176.96	5.98
C-A3	115.61	109.51	8.04
C-A5	120.04	95.21	8.04
C-A7	69.93	96.56	8.55
C-A10	47.82	137.68	7.72

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..12 Resultados de los cubos de mortero.

Fuente: Elaboración propia

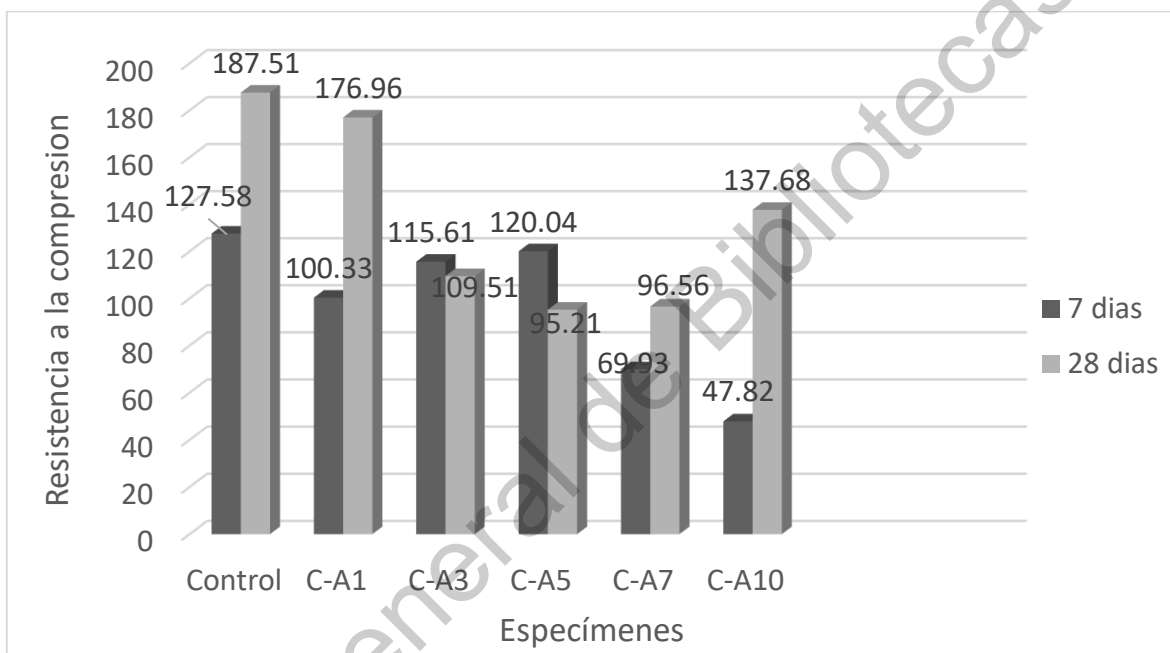


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..31 Resultados de la resistencia a la compresión en cubos de mortero.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados nos indican que los porcentajes con menor cantidad de aditivo son los que tienen mejor resistencia a la compresión, esto debido a que se debe de encontrar la proporción adecuada para que actúe como un aglutinante en la formulación polimérica del concreto.

Consecutivamente se evaluaron los morteros con sustitución a solo 28 días (tabla 4.6 y figura 4.7) y se observó que la muestra con sustitución del 5% de cemento con poliestireno expandido (EPS) de forma líquida (C-S5) obtuvo mejores resultados, superior en 5.5 %, incluso que la muestra de control (C-M).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..13 Resultados de los cubos de mortero en sustitución.

Espécimen	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		Absorción (%)
	28 días		
C-M	187.51		6.65
C-S3	149.71		5.79
C-S5	197.21		6.40
C-S7	123.21		6.81
C-S10	119.32		8.26

Fuente: Elaboración propia

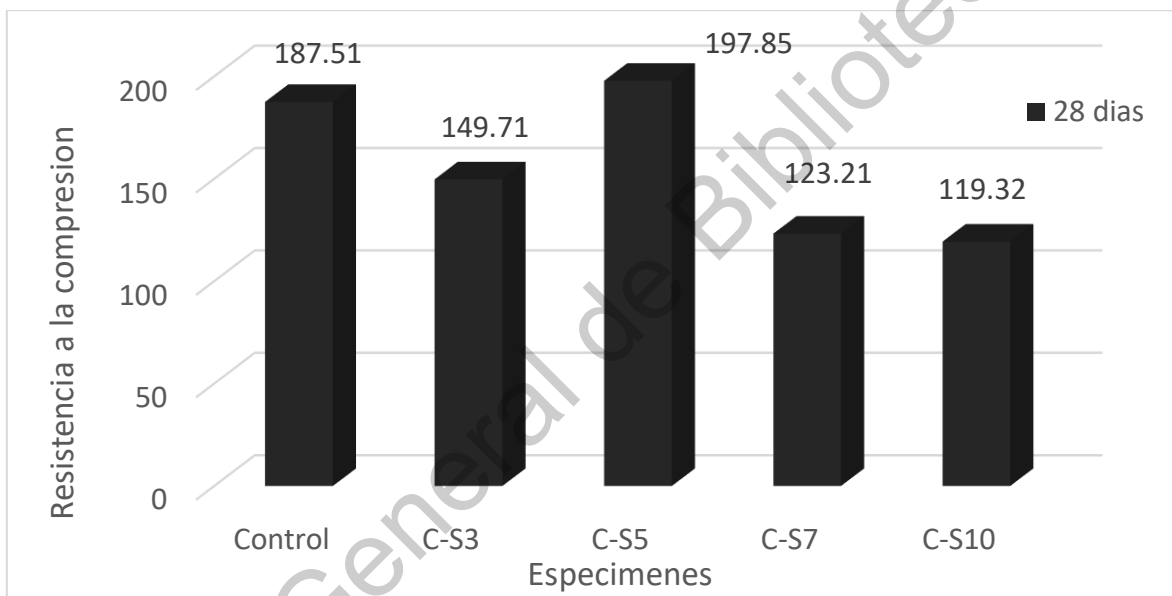


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..32 Morteros con sustitución a 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

Para proceder a las muestras de concreto, se tomaron los siguientes tres porcentajes:

1. C-A1. Se eligió este porcentaje ya que la resistencia a la compresión de los cubos de mortero a los 28 días, fue muy parecida a la de las muestras de control.
2. C-A5. Se tomo esta proporción por los resultados a 7 días que mostro, ya que estaba solo ligeramente por debajo que el mortero base.

3. C-S5.- Para finalizar, se optó por esta cantidad por ser la más prometedora, ya que, en la resistencia a la compresión a la edad de 28 días en los cubos de mortero, se mostró un incremento de casi un 6% respecto a las muestras de control.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 que se muestran a continuación, podemos observar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 3,7, y 28 días. Se eligieron las edades mencionadas para tener resultados tanto a corto plazo (3 días) como a largo plazo (28 días).

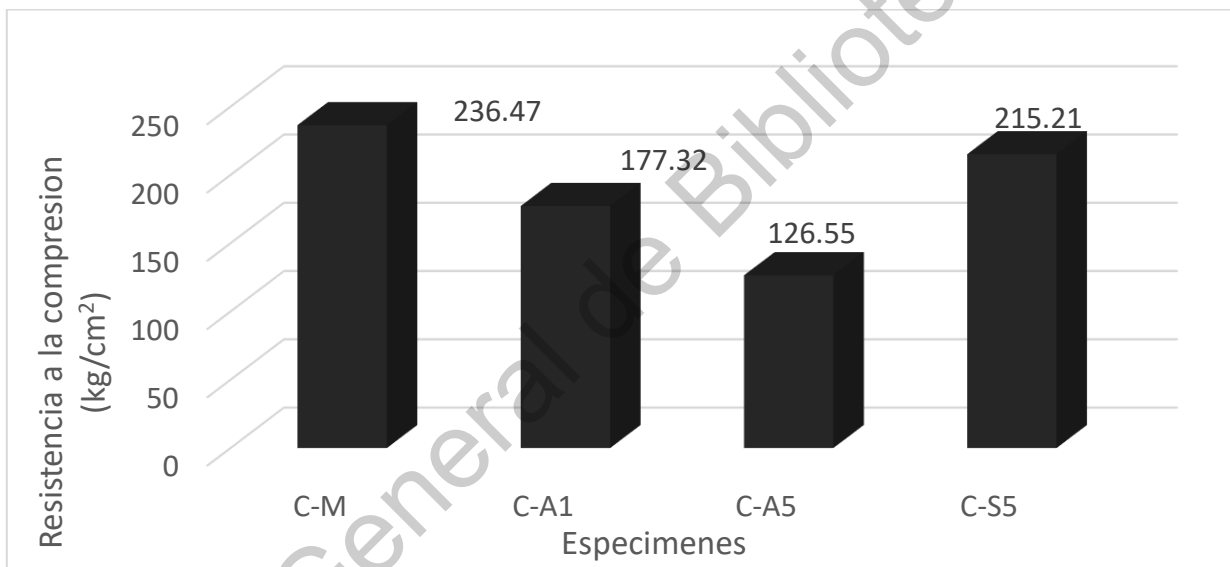


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..33 Especímenes de concreto a 3 días.

Fuente: Elaboración propia.



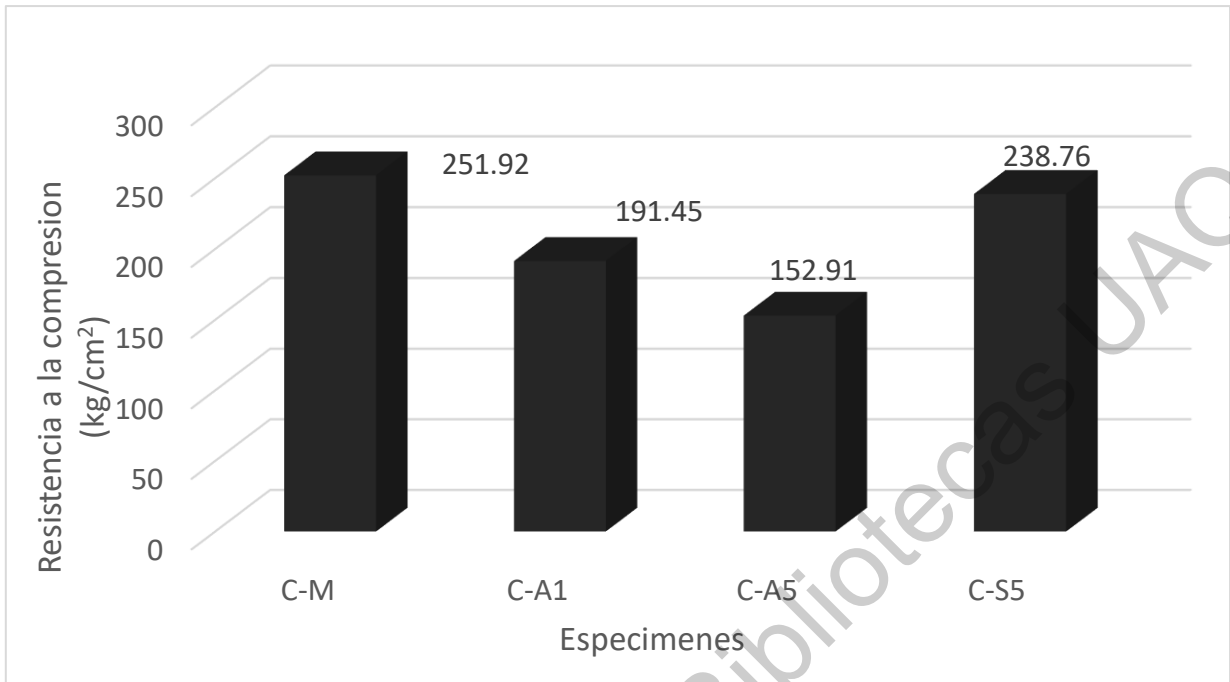


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..34 Especímenes de concreto a 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

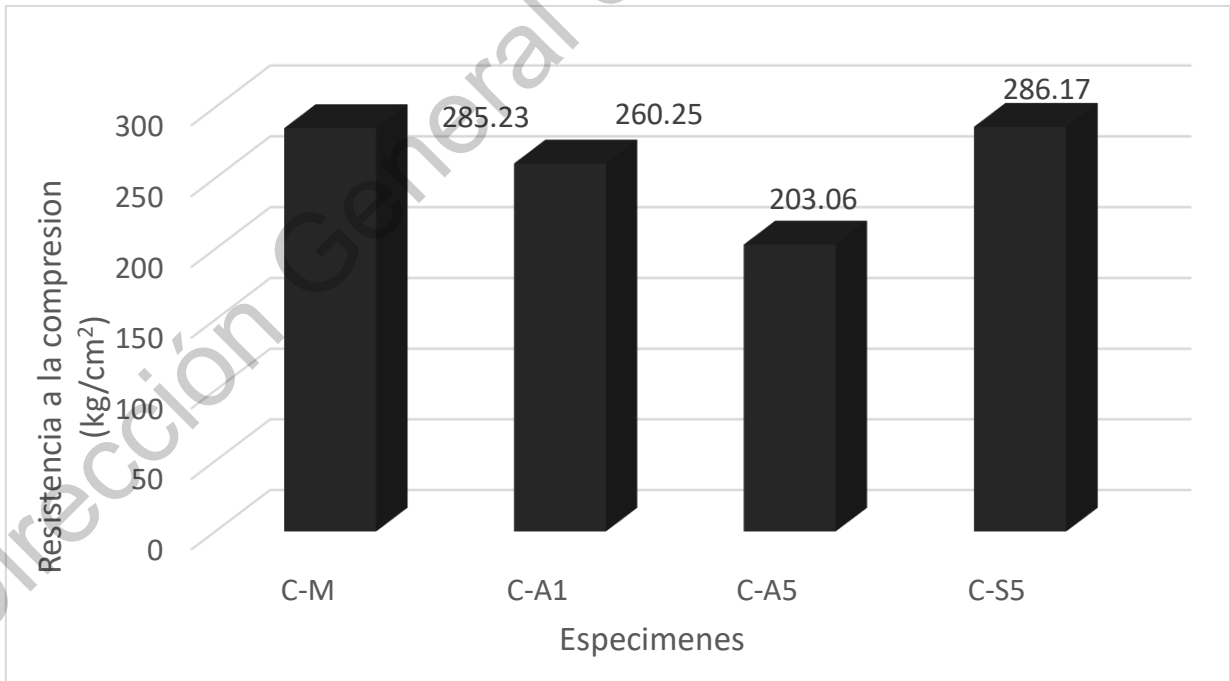


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..35 Especímenes de concreto a 28 días.  
Fuente: Elaboración propia

A manera de resumen se ilustra la figura 4.11, donde vemos la evolución de la resistencia a compresión en las diferentes edades que fueron evaluadas las probetas de concreto, cabe destacar que los datos mostrados son el promedio de tres especímenes realizados para cada tiempo de curado. Al analizar los datos se concluyó que el porcentaje de aditivo menor es el que tiene mejores resultados (1%), puesto que solo quedo 8% por debajo de las muestras de control. Mientras que la sustitución de una proporción de cemento por el aditivo utilizado demostró ser la mejor opción pues aumento su resistencia, en un mínimo porcentaje, incluso por encima que el concreto base.

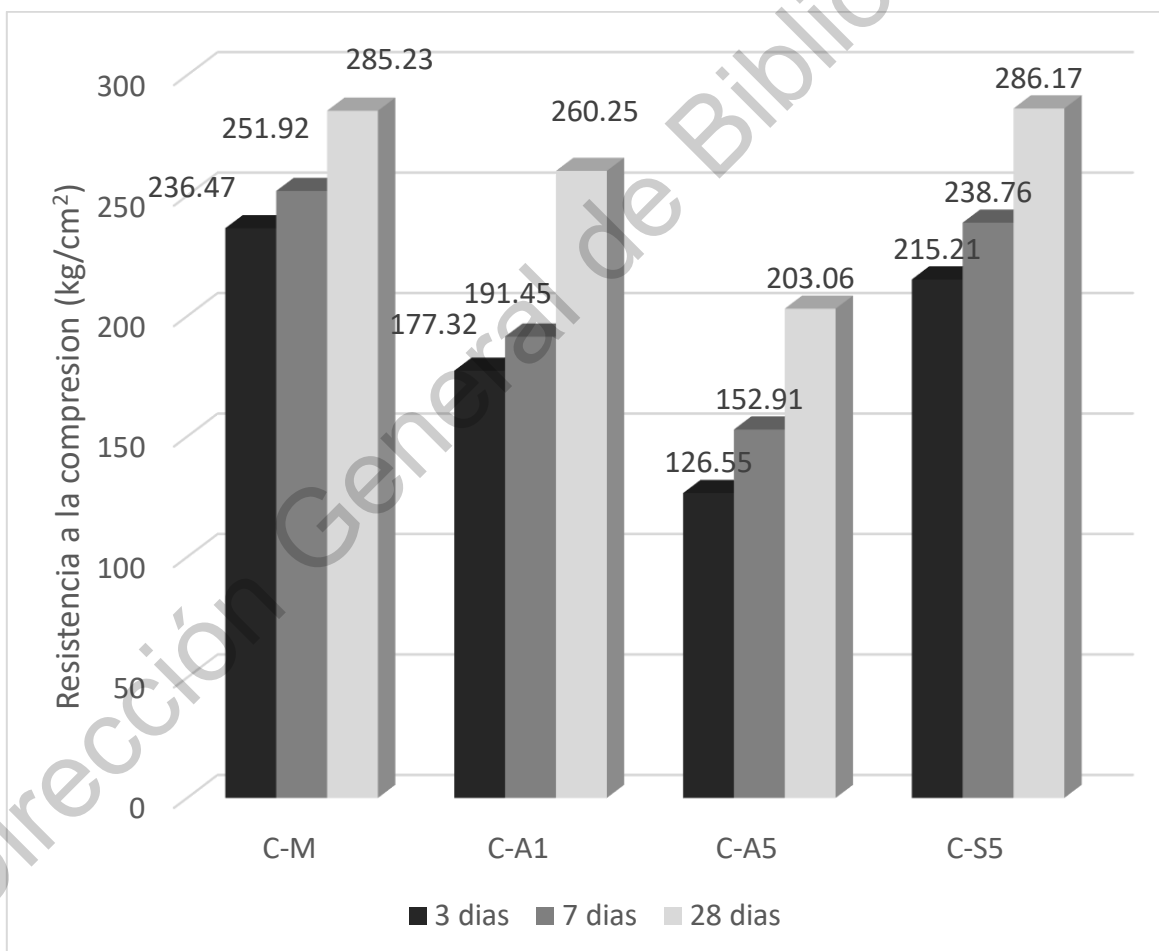


Figura 4.11 Resultados de la resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia

## Resistencia a la flexión

La resistencia a flexión fue evaluada de igual manera a tres tiempos de curado (3, 7 y 28 días) En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 a continuación, podemos ver los resultados obtenidos. Siendo de igual forma, la menor cantidad de aditivo la que nos da los mejores resultados (mejor resistencia a flexión en 1% que en 5% de aditivo) y la sustitución del 5% de cemento mantiene un módulo de ruptura similar que la muestra de control a los 28 días.

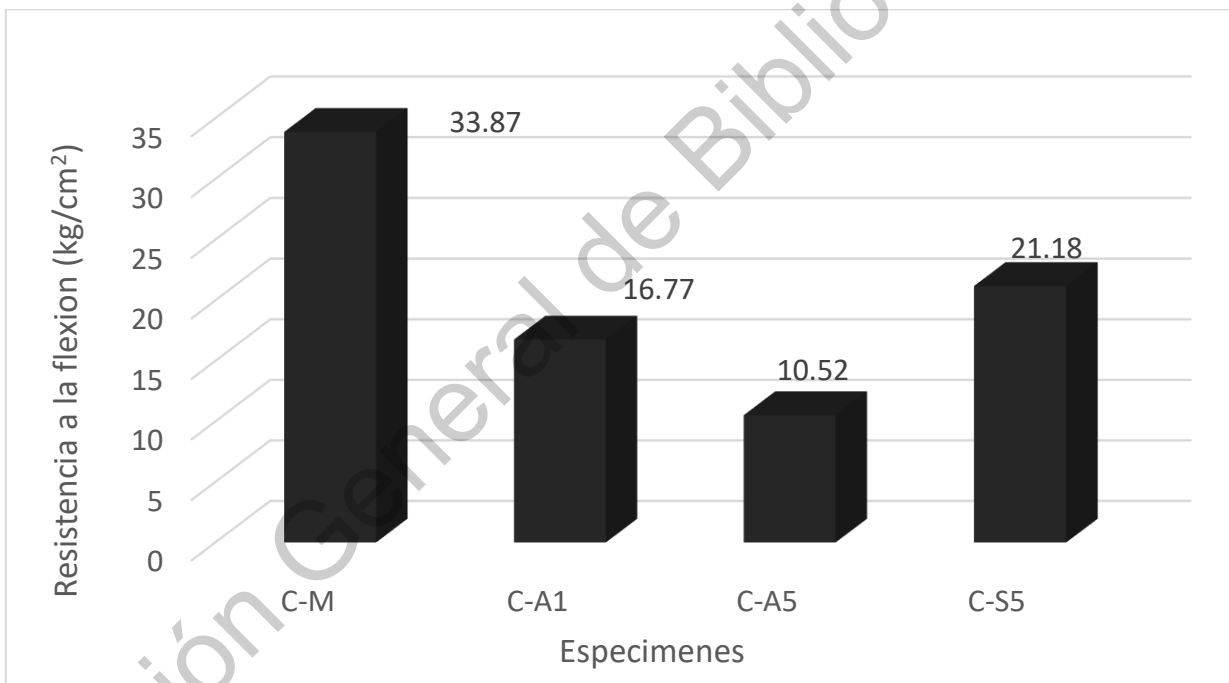


Figura 4.12. Resistencia a flexión de los especímenes de concreto a 3 días.

Fuente: Elaboración propia.

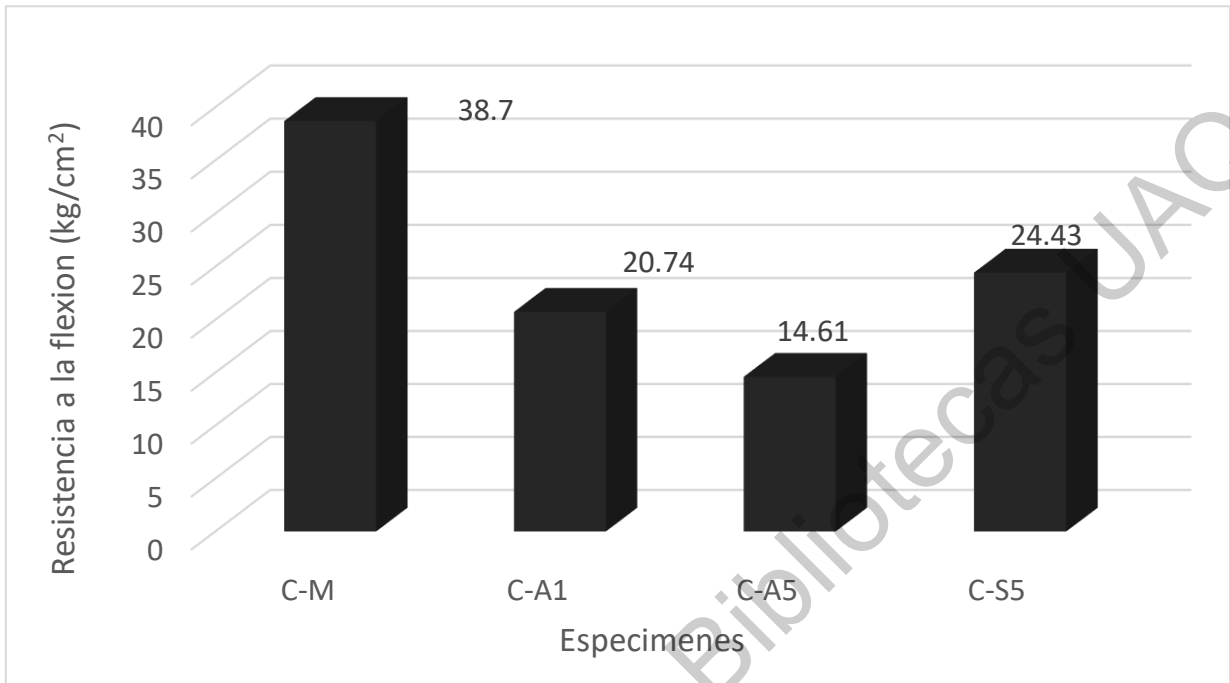


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..38 Especímenes de concreto a 7 días.  
Fuente: Elaboración propia

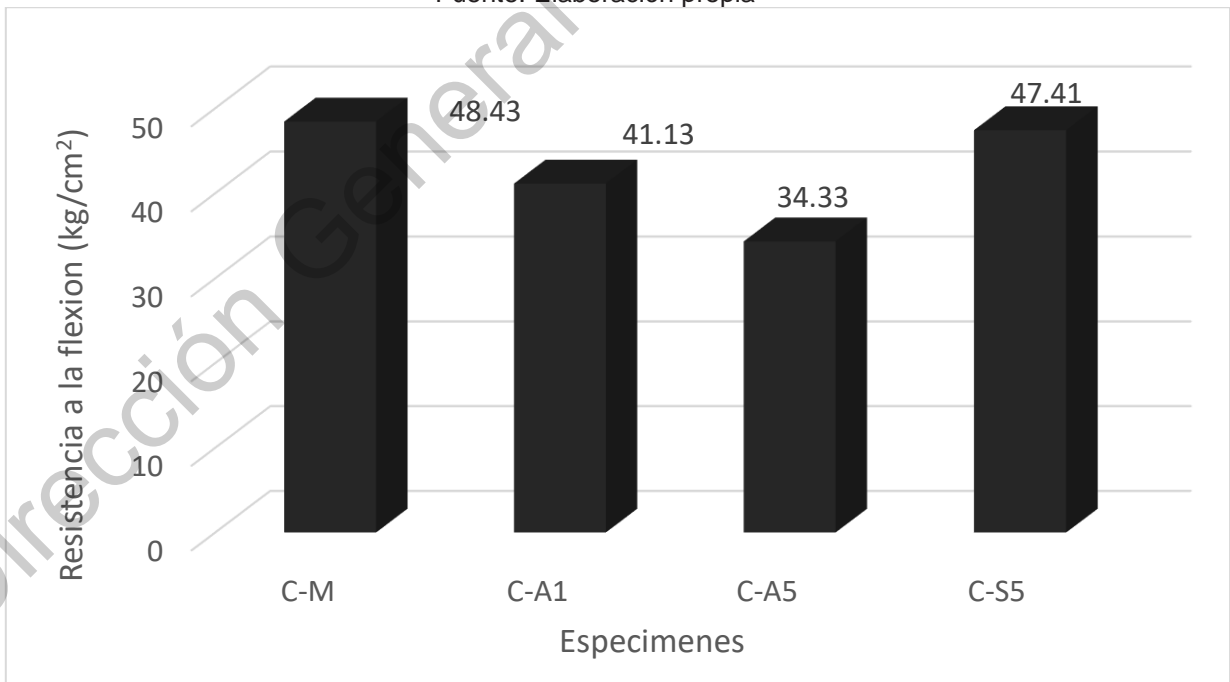


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..39 Especímenes de concreto a 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Para resumir los resultados a la flexión, se indica la figura 4.15, donde se observa un comportamiento de manera inusual puesto que las vigas que presentan aditivo tienen un incremento importante (hasta en un 134%) entre los 7 y los 28 días de curado, a diferencia de las vigas de control las cuales tienen un incremento paulatino de forma esperada de acuerdo al comportamiento del concreto.

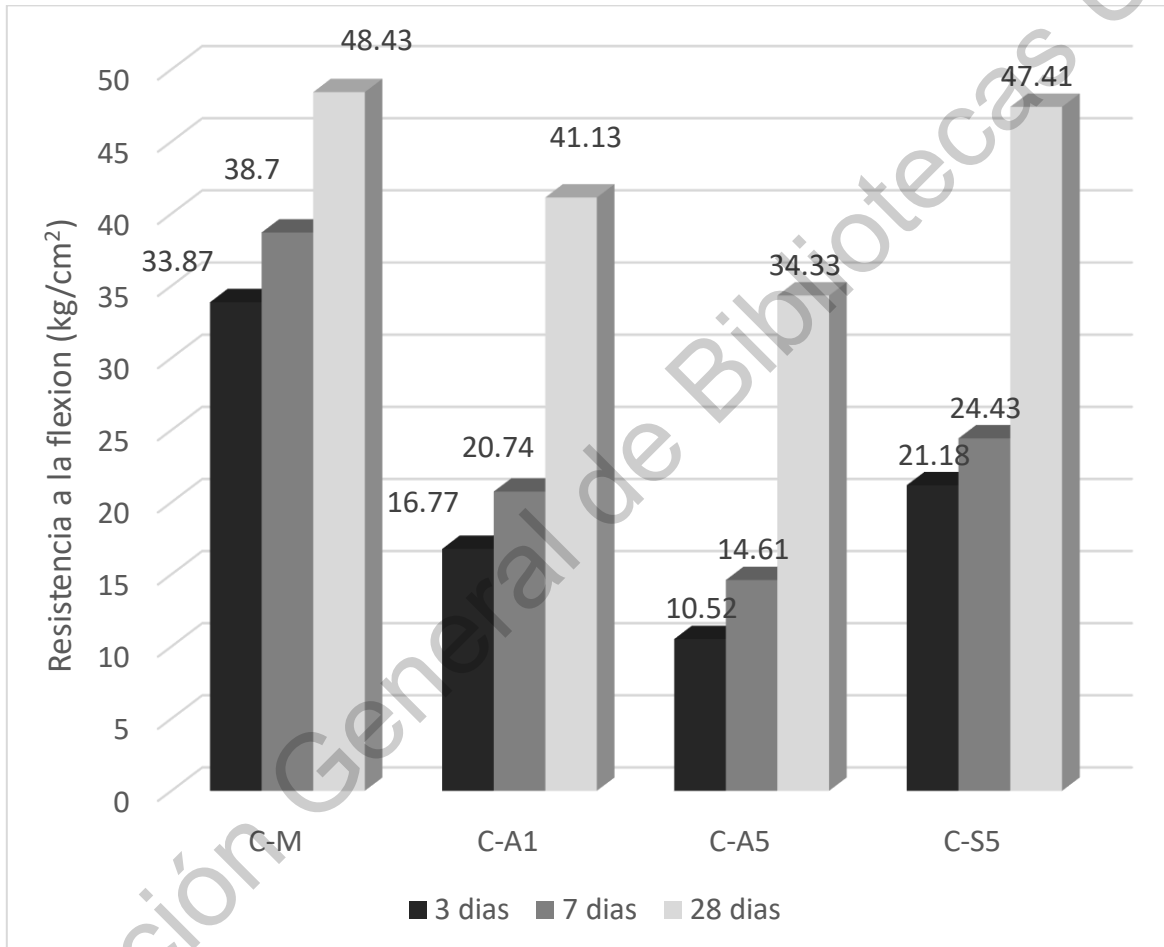


Figura 4.15 Resistencia a la flexión de 40 Especímenes de concreto a 28 días.

Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

El mejorar las propiedades de los pavimentos rígidos mediante la incorporación de poliestireno expandido como aditivo en forma líquida fue la principal aportación de esta investigación, se realizaron muestras con la adición de este polímero en 1, 3, 5, 7 y 10 % sobre el peso total del espécimen y también, sustituyendo un porcentaje de cemento con dichas proporciones del aditivo para 3, 7, 14 y 28 días, acorde a los resultados obtenidos en la fase experimental concluimos que:

1. El porcentaje de las muestras con 5% de EPS mostró resultados similares a las muestras de control en 7 días, pese a esto, a la edad de 28 días tuvieron una reducción significativa en su resistencia a compresión.
2. Por otro lado, la mezcla con el 10% de aditivo a 28 días tuvo un aumento significativo comparando con la edad de 7 días, que como ya se dijo anteriormente, esta redujo.
3. Las vigas de concreto con 5% de EPS mostraron una resistencia a la flexión más baja que los especímenes de control.
4. Los mejores resultados obtenidos se presentaron en la adicción del 1% de EPS a los 28 días, por lo que se deduce que los mejores resultados se obtienen con la menor cantidad de aditivo.
5. En la sustitución de cemento al 5%, la resistencia a la compresión fue superior en 5.5% a la de las muestras de control, debido a los enlaces y uniones que genera el aditivo líquido.

6. En comparativa con la resistencia a la flexión de las vigas de control y las del 5% a la edad de 3 y 28 días, obtenemos que, en el transcurso de 3 a 28 días, las vigas con aditivo triplican su resistencia.
7. Como conclusión final, podemos decir que se cumplió la hipótesis planteada, puesto que la utilización de un aditivo polimérico en los pavimentos rígidos genera un mejoramiento en sus propiedades mecánicas, por lo que esta mezcla para un pavimento de concreto puede tener las mismas o mejores propiedades mecánicas que un pavimento de concreto “convencional”, esto sin mencionar los beneficios ambientales que conlleva la reducción de contaminación por la producción del cemento

## **FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

Después de examinar los resultados obtenidos y analizar las conclusiones de este proyecto de investigación basado principalmente en el desarrollo de un aditivo líquido de poliestireno expandido (EPS) quedaron algunas interrogantes que podrían ser tomadas en cuenta para futuros trabajos respecto a este tema. De esta manera se considera conveniente plantear los siguientes aspectos:

1. Experimentar con proporciones más elevadas de EPS líquido (20%, 30%, 40% etc.) ya sea adicionándolo a la mezcla o sustituyéndolo en lugar del cemento.
2. Añadir mayor porcentaje de EPS a los solventes utilizados (30% EPS y 70% solventes fue la proporción utilizada en esta investigación)
3. Tiempos de curado más prolongados (por ejemplo 60, 90 y/o 120 días)



## REFERENCIAS

Adhikari, B., De, D. Y Maiti, S. (2000) Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress Polymer Science*. 7, 909-948.

Akchurin, T.K., Tukhareli, V.D., y Pushkarskaya, O.Y. (2016). The modifying additive for concrete compositions based oil refinery waste. *Procedia Engineering*. 150, 1485-1490.

Alcocer, S., Carrillo J., y Aperador, W. (2013). Mechanical properties of concrete for low-cost housing. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 14, 285-298.

American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC. USA. 625 p.

American Concrete Institute. (2013). *Concrete Terminology*. Michigan, USA. 78 p.

American Society for Testing Materials. ASTM C 39. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM C 78. (2016). *Standard test method for flexural strength of concrete*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM C 494. (2013). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM D 698 (2012). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM D 1557 (2012). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM D 6951 (2003). *Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM C 469. 2014. *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. Pennsylvania, USA.

American Society for Testing Materials. ASTM C 1585. 2013. *Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes*. Pennsylvania, USA.

Babu, D., Ganesh, K. and Wee, T. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. 35, 1218 -1223.

Bajdur, W., Pajaczkowska, J., Makarucha, B., Sulkowska, A. and Sulkowski, W. (2002). Effective polyelectrolytes synthesized from expanded polystyrene wastes. *European Polymer Journal*. 38, 299 -304.

Barker, D.J., Turner, S.A, Napier-Moore, P.A., Clark, M. and Davison, J.E. (2009) CO2 Capture in the cement industry. *Energy Procedia*. 1, 87-94.

Bashar, M., Musa, A. 2017. Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crum rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*. 159, 234-251.

Bernard E. O., (2017), Polymer Chemistry and Synthesis. *Polymer Science and Engineering*. 2, 17–40.

Bildirici, M. and Ozaksoy, F. (2018). Backward bending structure of Phillips Curve in Japan, France, Turkey, and the U.S.A. *Economic research- Ekonomiska Istrazivanja*.

- Boikovaa, T., Solovyova, D., y Solovyovaa, V. (2017). Concrete for road pavements. *Transportation Geotechnics and Geoecology*. 799-804.
- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T. and Fini, E. (2013) Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Science*. 9, 14 -24.
- Cadere, A., Barbuta, M., Rosca, B., Serbanoiu, A., Burlacu, A. and Oancea, I. (2017) Engineering properties of concrete with polystyrene granules. *Procedia Manufacturing*. 22, 288-293.
- Celis N. G. (2011). Pavimentos Carreteros con concreto. *Construcción y Tecnología. IMCYC*. 6, 44-47.
- Cemex. 2001. *Manual de pavimentos de concreto*. México.
- Chen, B. and Liu, J. (2004) Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*. 34, 1259 -1263.
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Julien, A. (2010) Environmental impact of cement production: detail of the different process and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*. 18, 478-45.
- Choi, N.W. and Ohama, Y. (2004) Development and testing of polystyrene mortars using waste EPS solution-based binders. *Construction and Building Materials*. 18, 235 -241.
- Cipriano, A. 2004. *Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto*. Colombia. 183 p.
- Crespo Villalaz C. (2004). *Vías de Comunicación*. México. Limusa. 756 p.
- Coreño A. & Méndez B., (2010), Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*. 21, 291-299.

- Curry, A. (2010). New Chemistry, less energy could yield greener cement. *National Geographic*.
- Gomez, M., Perez, I. and Pasandin, A. (2016) Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixture: evolutionary properties. *Journal of Cleaner Production*. 112, 588-598.
- González, O., Peña, J., Muñoz, M., Santamaría, A., Pérez, A. and Martínez, F. (2002). Rheological techniques as a tool to analyze polymer bitumen interactions: bitumen modified with polyethylene and polyethylene based blends. *Energy & Fuels*. 16, 1256 -1263.
- Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., Picornell, M. and Amer, S. (2011). Development of sustainable engineered stone cladding for toughness, durability and energy conservation. *Construction and Building Materials*. 25, 4006 -4016.
- Horvath, J.S. (1994) Expanded polystyrene (EPS) Geofoam: an introduction to material behavior. *Geotextiles and Geomembranes*. 13, 263-280.
- Huerta Martinez R. (2002) Juntas en las construcciones de concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*.
- Icontec. 2010. *Normas técnicas colombianas para el sector de la construcción*. Colombia. Legis Editores S.A. 33 p.
- Icpc. 1974. *Manual de dosificación de mezclas de concreto*. Colombia. 198 p.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 2009. *Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson*. *Construcción y Tecnología*. México.18, 67-71.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2004). Pruebas de concreto. *Construcción y Tecnología*. México. 3, 12-21.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2006). Prueba de Resistencia a la compresión del concreto. *Construcción y Tecnología*. México. 5, 19-23.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2006). Los aditivos para concretos. *Construcción y Tecnología*. México. 38.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 2004. Propiedades del Concreto. *Construcción y Tecnología*. México. 9-15.

Jun-Mo, Y., Hyun-Oh, S., Doo-Yeol, Y. 2017. Benefits of using amorphous metallic fibers in concrete pavement for long-term performance. *Archives of civil and mechanical engineering*. 17, 750-760.

Kalantar, Z., Rehan, K. and Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*. 151, 907-915.

Kan, A. and Demirboga, R. (2009). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foam as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*. 209, 2994-3000.

Kaya, A. and Kar, F. (2016) Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*. 105, 572-578.

Korochkin, A. (2018). Impact of rigid pavements with the asphalt-concrete wearing course on road performance and traffic safety. *Transportation Research Procedia*. 36, 315-319.

Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M.G., Sánchez Blanco, V., y Del Val, M.A. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. España. Mc Graw Hill. 555 p.

Krayushkina, K., Khymerik, T., Skrypchenko, O., Moshkovskiy, I., y Pershakov, V. (2017). Investigation of fiber concrete for road and bridge building. *Procedia Engineering*. 187, 620-627.

- Lavelle, M. (2011). Better road building paves way for energy savings. *National Geographic*.
- Mamlouk, M., y S., Zaniewski, J.P. (2009). *Materiales para Ingeniería Civil*. Pearson Prentice Hall.
- Markivc, 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.
- Milind, M. and Kadam, K. (2016) A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 13, 84-88.
- Moczko, A., y Moczko M. (2016). GWT – New testing system for “in situ” measurements of concrete water permeability. *Procedia Engineering*. 152, 483-489.
- Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L. and Nazem, M. (2017) Expanded polystyrene geofoam in pavement construction. *Construction and Building Materials*. 157, 438-448.
- Montejo, F.A. (2008) *Ingeniería de pavimentos, fundamentos, estudios básicos y diseño. Tomo 1*. Universidad Católica de Colombia, ediciones y publicaciones. Colombia
- Nagroćkienė, D., Girskas, G., y Skripkiunas, G. (2016). 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 Adam M. (1999). Tecnología del concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y Concreto*.

NMX-C-030-ONNCCE-2004. Industria de la construcción- Agregados-*Muestreo*.

NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria de la construcción- Cementantes hidráulicos- *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*.

NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción- Agregados- *Masa volumétrica- Método de prueba*.

NMX-C-077-ONNCCE-2006. Industria de la construcción- Agregados para concreto-*Análisis Granulométrico-Método de ensayo*.

NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la construcción- Concreto- *Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes- Método de ensayo*.

NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción –Agregados para concreto hidráulico– *Especificaciones y métodos de prueba*.

NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la construcción –Agua para concreto– *Especificaciones*.

NMX-C-128-ONNCCE-1997. Industria de la construcción –Concreto sometido a compresión– *Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson*.

NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la construcción- Concreto- *Elaboración y curado de especímenes de ensayo*.

NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción –Agregados– *Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso*.

NMX-C-170-ONNCCE-1997. Industria de la construcción –Agregados– *Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.*

NMX-C-191-ONNCCE-2004 Industria de la construcción –Concreto– *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.*

NMX-C-196-ONNCCE-2010 Industria de la construcción –Agregados– *Determinación de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto de agregados gruesos usando la máquina de los Ángeles.*

NMX-C-414-ONNCCE-2010, Industria de la construcción –Cementos hidráulicos– *Especificaciones y métodos de prueba.*

NMX-C-472-ONNCCE-2013. Industria de la construcción – *Determinación del flujo de revenimiento del concreto autoconsolidable- Método de ensayo.*

Ochoa, R. (2014). Pavimentos de concreto y modernización carretera en México. *Construcción y Tecnología en Concreto*. Octubre 2014, 18-25 p.

O’Flaherty, C. (2002). *Highways: The location, design, construction and maintenance of pavements*. Great Britain. Butterworth-Heinemann. 571 p.

Olivera Bustamante, F. (2004) *Estructuración de vías terrestres*. Continental. México. DF. 407 p.

Payá, J., Tobón, J.I., y Restrepo, O.J. (2010). Comparative analysis of performance of Portland cement blended with nanosilica and silica fume. *Dyna*. 163, 37-46.

Podzimek, S. (2017). Synthetic polymers. *Science and Chemical Engineering*. 34, 257 – 266.



Polacco, G., Merusi, F. and Stastna, G. (2015). A review of fundamentals of polymer modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*. 224, 72-112.

Portland Cement Association. (1984). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Illinois, USA.

Portland Cement Association. (1974). *Thickness design for concrete pavements*. Illinois, USA.

Rico Rodríguez A., & Del Castillo H. (1992). *La ingeniería de suelos en vías terrestres. Vol.1.* edición. México. Limusa. 460 p.

Rico Rodríguez A. & Del Castillo H. (1977). *La ingeniería de suelos en vías terrestres. Vol. 2.* México. Limusa. 650 p.

Salazar Rodríguez A. (2011). *Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Sánchez Sabogal F. (2005) *Glosario de ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (1998). *Normas de Construcción e Instalaciones*. México. Autor. 346 p.

Shen, L., Fan, Y. y Zhaohui, L. (2017). A new structure for continuously reinforced pavement with road performance evaluation. *Construction and Building Materials*. 157, 1047-1052.

Schmidt, P., Cioffi, M., Voorwald, H. y Silveria, J., (2011), Flexural Test On Recycled Polystyrene. *Engineering Procedia*. 10, 930-935.

Tang, W.C.; Lo, Y y Nadeem, A (2008). "Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete". *Cement & Concrete Composites*, 30, 403–409.

Tehmina, A., Nasir, S. y Fadhil, N. (2014) Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*. 77, 131-139.

Wang, Y., Chong, D. & Wen Y. (2017) Quality verification of polymer modified asphalt binder used in hot mix asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*. 150, 157-166.

White, G., y McCallum, A. (2017). Review of ice and snow runway pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 11, 311-320.

Yang, J.M., Shin, H.O. and Yoo, D.Y. (2017) Benefits of using amorphous metallic fibers in concrete pavement for long term performance. *Archives of civil and mechanical engineering*. 17, 750-760.

Yang H. Huang. (2004). *Pavement Analysis and Design*. United States of America. Pearson Prentice Hall. 775 p.

Yingli, G., Bei, H., Youyun, L., Jianliang, T., y Liangchen, Q. (2017). Effects of nanoparticles on improvement in wear resistance and drying shrinkage of road fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 151, 228-235.

Zarate, A. M. (2003). *Diseño de pavimentos flexibles. Primera parte*. Asociación Mexicana del Asfalto A.C. México. DF.

Zarate, A. M., Salazar Rodríguez A., y Tena Colunga J.A. (2002). *Pavimentos de concreto para carreteras*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. México. DF.